



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## KONSTRUKCE STOJANU PRO FILAMENTY V CÍVKÁCH

CONSTRUCTION OF THE STAND FOR THE FILAMENTS ON SPOOLS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Bezděk

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Škaroupka, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Petr Bezděk**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. David Škaroupka, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Konstrukce stojanu pro filamenty v cívkách

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Problémem současných držáků a stojanů je bezpečné a plynulé odvíjení filamentu bez zadrhávání, nebo samovolného odvíjení. V laboratoři odboru jsou testovány cívky o hmotnosti 250 g až 2,5 kg na různých typech 3D tiskáren (stolní i profesionální). Vzhledem k nutnosti evidovat množství spotřebovaného materiálu pro statistické účely je zároveň nutné, aby zařízení obsahovalo mikroprocesorový čítač. Výstupem bude funkční zařízení, zpracované kvalitativně na úrovni komerčního produktu.

Typ práce: vývojová – konstrukční

### Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je vyvinout stojan s minimálním odporem při odvíjení, který eliminuje zadrhnutí vlákna a počítá množství odvinutého materiálu.

Díličí cíle bakalářské práce:

- identifikovat konstrukční a uživatelské problémy,
- navrhnout koncepční řešení – řešení identifikovaných problémů,
- výroba zvoleného řešení,
- ověření správné funkce zařízení.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2019.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.

DRUMM, Brook. Make: 3D printing projects. San Francisco: Maker Media, 2015. ISBN 9781457187247.

FRANCE, Anna Kaziunas. Make: 3D printing. Sebastopol, CA: Maker Media, 2013. ISBN 978-14-7182-938.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je vyvinout stojan na cívky filamentu s minimálním odporem při odvíjení, který eliminuje zadrhnutí vlákna a počítá množství odvinutého materiálu. Stojan je určen pro cívkový filament v hmotnostním rozsahu 250 g až 2,5 kg. Dále je cílem, aby stojan byl univerzální a použitelný pro různé 3D tiskárny. Problém je řešen tak, že na základě rozboru použitelných koncepcí je zvolena nejvhodnější koncepce pro daný problém. Práce obsahuje přehled poznání podstatných faktů týkajících se stojanů, odvíjení a 3D tisku. Následně jsou klíčové problémy analyzovány na bázi bilancování výhodnosti možných variant koncepce. Zvolená koncepce je vyřešena konstrukčně po částech, které nakonec tvoří funkční celek a zkompleťovaný výrobek. Výsledkem je kompletní návrh stojanu v podobě písemné práce, výrobní dokumentace a zhotoveného výrobku. Funkce stojanu byla ověřena testováním. Práce je tak přínosná z hlediska rozšíření povědomí o problematice stojanů, identifikování problémů 3D tisku spojených se stojanem na cívky, vytvoření návrhu a hotového výrobku pro použití při tisku. Návrh je celý koncipován pro výrobu pouze jednoho kusu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

stojan, 3D tisk, odvíjení filamentu, cívka, minimální odpor, evidence spotřeby

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to develop a stand for filament spools with minimal unwinding resistance, which eliminates stitching of filament and calculates the amount of unwound material. The stand is designed for a spool filament in the weight range of 250 g to 2.5 kg. Furthermore, the goal is to make the stand universal and usable for various 3D printers. The problem is solved by selecting the most appropriate concept for the problem based on the applicable concept analysis. The work contains an overview of the essential facts concerning stands, unwinding and 3D printing. Subsequently, the key issues are analysed on the basis of balancing the benefits of the possible variants of the concept. The chosen concept is solved in structural parts, which ultimately form a functional unit and a completed product. The result is a complete stand design in the form of written work, production documentation and manufactured product. The stand function has been verified by testing. The work is beneficial in terms of expanding awareness of rack issues, identifying 3D printing problems associated with the spool stand, designing and finished products for use in printing. The design is entirely designed to produce only one piece.

## KEYWORDS

stand, 3D print, filament unwinding, spool, minimal resistance, consumption records





## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BEZDĚK, Petr. *Konstrukce stojanu pro filamenty v cívkách*. Brno, 2019, 59 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Škaroupka, Ph.D.





## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Davidu Škaroupkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a připomínky, a firmě INKOS CZ s.r.o. za umožnění používání prostředků pro návrh a realizaci práce.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Škaroupky, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Petr Bezděk



# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
2.1	Vznik, vývoj a současnost 3D tisku	15
2.1.1	Počátky 3D tisku	15
2.1.2	Rozmach aplikací technologie	16
2.1.3	Současnost a očekávání do budoucna	16
2.2	Funkce tiskárny s technologií FDM	16
2.3	Poruchy při tisku ze strany filamentu	17
2.3.1	Struna není dodávána do tiskárny	17
2.3.2	Nesouvislá dodávka struny do tiskárny	18
2.3.3	Poškození nebo znečištění struny	19
2.4	Stojany dostupné na trhu	19
2.4.1	Stojan jako součást tiskárny	19
2.4.2	Externí stojany vyrobené uživateli tiskáren	21
2.4.3	Externí stojany od profesionálních výrobců	22
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>23</b>
3.1	Analýza problémů	23
3.1.1	Problém různorodosti rozměrů cívek	23
3.1.2	Problém měření množství spotřebovaného materiálu	24
3.1.3	Problémy spojené s uložením	25
3.1.4	Problém dovíjení a směru tažné síly	25
3.1.5	Uživatelské problémy	26
3.2	Cíl práce	26
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>27</b>
4.1	Koncepce používaných typů uložení cívky	27
4.1.1	Zavěšení cívky na pevný hřídel	27
4.1.2	Odvalování na dvojici hřídelů	28
4.1.3	Upnutí do ložisek v ose cívky	29
4.2	Zvolené uložení cívky	30
4.2.1	Vertikální varianta v ložiscích	30
4.2.2	Horizontální koncepce uložení cívky	31
4.3	Měřicí soustava	32
4.3.1	Samostatná měřicí soustava	32

4.3.2	Digitální váha	33
4.4	Manipulační soustava	33
4.4.1	Koncepce s pravým a levým šroubem	33
4.4.2	Koncepce s vodícím šroubem ze strany	34
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>36</b>
5.1	Upínací kužely	36
5.2	Hřídele a jejich uložení	37
5.3	Lineární vedení sloupků	40
5.4	Šroubové vedení domků	41
5.5	Rám a podstava stojanu	42
5.6	Průvlak	43
5.7	Elektronický čítač stojanu	44
5.8	Sestava celku	45
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>46</b>
6.1	Rozměrové dispozice	46
6.2	Uživatelská zkušenost se stojanem	47
6.3	Odvíjení filamentu	48
6.4	Měření úbytku filamentu, samovolné dovíjení a odvíjení	51
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>52</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>57</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>59</b>
11.1	Výkresová dokumentace	59

# 1 ÚVOD

3D tisk je technologie, jejíž popularita napříč světem roste. Je to díky možnostem vytvořit výrobek jednoduchých i složitých tvarů z výběru mnoha materiálů a barev. Nejběžnější polotovar používaný pro tisk výrobků z plastu je cívkový filament. Materiál je do tiskárny dodáván v podobě plastové struny (filamentu), která se teplem uvádí do polotekutého stavu a nanáší ve vrstvách, které následně tvoří výrobek. V součinnosti s materiálem se používá i podpůrný materiál, jehož spotřeba a použití závisí na konkrétním výrobku.

Tato práce se zabývá řešením pro uchycení a odvíjení cívek obsahujících filament. V současné době jsou stojany pro cívky řešeny většinou hřídelem pro zavěšení na tiskárně, nebo neprofesionálním řešením různého tvaru a funkce. Profesionální samostatný stojan od výrobců příslušenství tiskáren je spíše raritou. Funkcí běžných stojanů je především uchycení cívky tak, aby neležela a mohla se hýbat. Stojany běžných konstrukcí ale mají svá omezení, především rozměrová. Není na nich ani nijak uvažována hmotnost cívek. Stojan, který v této práci navrhuji, se od běžných stojanů liší zvláštními požadavky na jeho funkce. Požaduje se od něj možnost upnout libovolnou cívku v rozsahu hmotnosti 250 g až 2,5 kg. Dále se vyžaduje dosažení co nejnižšího odporu proti odvíjení a možnost evidovat spotřebu materiálu. Navržení takového stojanu je potřebné z důvodu různorodosti rozměrů cívek. Dostupné na trhu jsou materiály s cívkami nestandardizovaných rozměrů. Protože filament je kromě materiálu k tisku i členem, který uvádí cívku do pohybu, je nutné, aby přenášel při svém malém průřezu a pevnosti co možná nejmenší sílu potřebnou k rozpohybování cívky.

Práce zahrnuje základní pojednání o 3D tisku a současné poznání problematiky týkající se stojanů pro cívkový filament. Obsahuje dále analýzu problémů, které jsou podstatné pro dosažení cílů práce. Přínosem práce je výsledný návrh a sestavení zařízení, které umožňuje upnutí libovolné cívky při splnění požadovaných kritérií. Mým cílem je tak nejen popsat problematiku a vytvořit návrh, ale také ho zhotovit jako výrobek a umožnit tak jeho otestování, používání a případný další vývoj na základě zkušeností z používání stojanu.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3D tisk je aditivní technologie sloužící k vytváření součástí pomocí přidávání materiálu. Materiál je přidáván na základě vytvořeného počítačového modelu v podobě vrstev postupně kladených na sebe. Jde o moderní metodu výroby součástí, která je vhodná především pro kusovou výrobu. 3D tisk se postupně stává oblíbenou technologií nejen mezi odborníky z oblasti průmyslu, ale i mezi umělci a širokou veřejností. Rozšiřování této technologie hodně přispívá skutečnost, že tiskárny jsou v dnešní době dostupné na trhu za přijatelné ceny a existují veřejně přístupné databáze modelů od uživatelů napříč světem, které získávají každým dnem další nový obsah volně ke stažení [1].

### 2.1 Vznik, vývoj a současnost 3D tisku

#### 2.1.1 Počátky 3D tisku

Technologie 3D tisku vznikla na počátku 80. let 20. století. Kladením vrstev materiálu na sebe se v té době začalo zabývat několik na sobě nezávisle pracujících techniků, např. Dr. Hideo Kodama z Nagoyského výzkumného institutu, který k těmto účelům jako první využil fotosenzitivní pryskyřice a její polymerizaci pomocí UV záření. [2] Tomu se ale nepodařilo včas předložit podklady pro patentování příslušným úřadům. [2] První, komu se podařilo patentovat technologii v oblasti 3D tisku byl Charles Hull, a to konkrétně stereolitografii, zkráceně SLA. [2] Tato metoda funguje na principu vytvrzování tekutého materiálu světelným paprskem, který kreslí požadovaný tvar vrstvy. [3] Následně byla vyvinuta technologie FDM (fused deposition modeling) spočívající ve vytlačení materiálu tiskovou hlavou. Metoda byla patentována společností Stratasys v roce 1992. [4] Tato společnost vyráběla stroje pro tisk nejen pro výrobce, ale i jednotlivce pro domácí použití.

### 2.1.2 Rozmach aplikací technologie

Nové metody výroby se ujali nejprve vědečtí pracovníci, například z oblasti medicíny. Potřeba orgánů pro transplantace motivovala vědce, aby se pokusili tisknout orgány pro lidské tělo. Vznikla tak třeba v roce 2000 tištěná ledvina, transplantována ale byla až o 13 let později. [4] Vzhledem k úspěšné funkci ledviny se dnes začíná těchto technologií využívat ve větší míře právě v oblasti medicíny. V roce 2004 došlo ke zvětšení objemu produkce tiskáren díky vzniku projektu RepRap. Jde o open source projekt, jehož myšlenkou je sebereplikující tiskárna, tj. výroba tiskáren vytištěním na tiskárně jiné. [5] Nárůst popularity mezi uživateli na sebe nenechal dlouho čekat. Dalším výrazným momentem pro 3D tisk byl rok 2009, kdy vypršela doba platnosti patentu technologie FDM. [4] To vedlo k poklesu cen a dalšímu nárůstu dostupnosti technologie. V dalších letech se tak z technologie pouze pro zasvěcené stává věc známá a užívaná širokou veřejností.

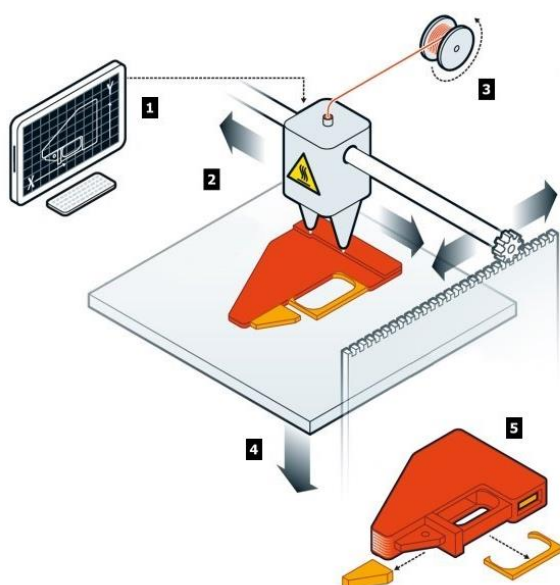
### 2.1.3 Současnost a očekávání do budoucna

V současné době lze pozorovat snahu o experimenty s 3D tiskem ve všech myslitelných odvětvích. Přestože ne všude je tento způsob výroby perspektivní, v oblasti prototypování zřejmě zatím nemá konkurenci. Je také snaha o tisk poměrně netradičních předmětů. Například NASA zkoumá možnosti 3D tisku jídla pro astronauty přímo ve vesmíru. [4] Mnoho pokusů také probíhá i v tradičních odvětvích, jako je třeba tisk betonu ve stavebnictví. [4]

## 2.2 Funkce tiskárny s technologií FDM

3D tisk se realizuje pomocí různých zařízení, jako například 3D tiskáren, tiskových robotů nebo per. Nejběžnější je mezi veřejností používání 3D tiskáren. Tiskárny mohou pracovat na různých technologických principech, ale cívkový filament využívá pouze technologie FDM (někdy označována také jako FFF). Jde o zkratku Fused Deposition Modeling, což lze přeložit jako modelování pokládáním taveného plastu. Tato technologie využívá pro tvorbu výrobku termoplastický tiskový filament. Ten je natahován pomocí tiskové hlavy – extruderu. Extruder filament nejen vtahuje, ale zároveň i taví do polotekutého stavu. V tomto stavu je materiál postupně nanášen na stavební podložku. Tam, kde je třeba, vytváří tiskárna podpurné struktury z materiálu rozpustného ve vodě, například pokud je vyráběn výrobek s dírou v tištěné stěně. Vytvoří se tím dočasný podklad pro tiskový materiál. [6]





**obr. 2-1** Schéma tiskárny pracující na principu FDM. Data z počítače (1) řídí tisk. Extruder (2) vtahuje filament z cívky (3). Extruder se pohybuje pouze ve dvou osách v rovině, vertikální osový pohyb zajišťuje stolek (4). Výrobek (5) je tvořen výrobním materiálem (červeně) a podpurným materiálem (oranžově) [7].

## 2.3 Poruchy při tisku ze strany filamentu

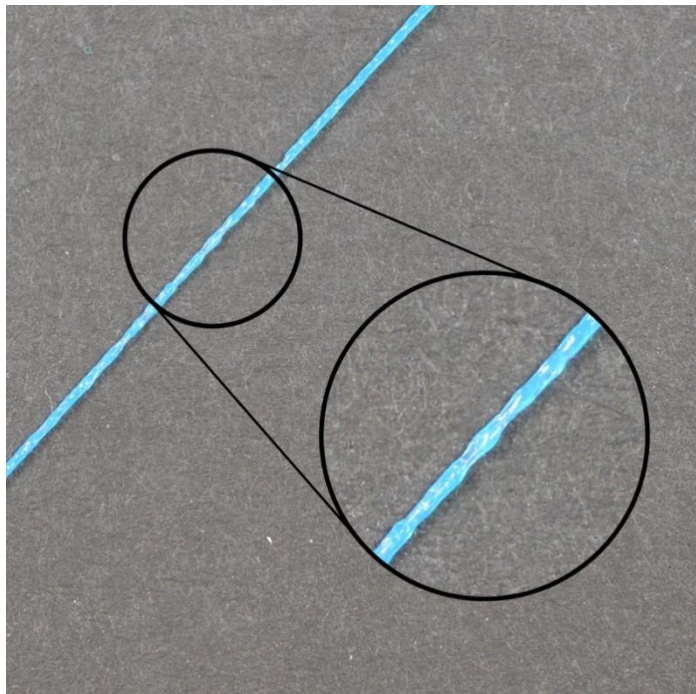
V průběhu tisku součásti v 3D tiskárně může docházet k celé řadě poruch a problémů, které mohou více či méně narušit proces tisku a způsobit tak znehodnocení výrobku a ztrátu času uplynulého při tisku. Stojan na filament může ovlivnit část těchto poruch, a to konkrétně těch vztahujících se k filamentu. Vhodná konstrukce stojanu může být způsobem, jak poruchám předcházet.

### 2.3.1 Struna není dodávána do tiskárny

Na trhu jsou dnes tiskárny, které na základě informace od optického senzoru filamentu v extruderu reagují na absenci filamentu a pozastaví tisk [8]. Tato funkce není dostupná u všech modelů na trhu. Zároveň nelze spoléhat na stoprocentní spolehlivost této metody detekce – když už je dodávka filamentu déle přerušena, je poměrně pozdě na to rychle začít problém řešit. Technicky mohou nastat dvě varianty této situace. Filament se může buď přetrhnout, nebo vypotřebovat z cívky. Tomu je nutné předejít konstrukčním řešením proti přetržení. Vypotřebování filamentu musí být možné vizuálně rozpoznat. Stojan tedy musí umožnit vizuální kontrolu přítomnosti filamentu na cívce.

### 2.3.2 Nesouvislá dodávka struny do tiskárny

Pokud dojde k nesouvislému přísunu filamentu, viditelně se to projeví na kvalitě tisku. Stopa tisku bude mít proměnlivou tloušťku, protože při zadrhávání se nebude dostávat dost materiálu k výtisku [9].



**obr. 2-2** Nesouvislá extruze. Při bližším pohledu na stopu lze odhalit proměnlivou tloušťku stopy. Jednou z příčin tohoto jevu může být zadrhávající filament [10].

Problém může nastat hned několika příčinami. Pokud začneme u uložení cívky, odpor v uložení cívky může způsobit zadrhnutí celé cívky. Tření či valivý odpor při špatném uložení může celé cívce pohyb brzdit nebo dokonce znemožnit. Tomuto jevu lze zabránit vhodným uložení cívky. Další příčinou může být zadrhnutí či zaseknutí struny na trase mezi cívkou a extruderem. Záleží na provedení trasy filamentu – není-li tento problém dopředu zvažován, pak filament není k extruderu nebo prostoru tiskárny veden po určené trase, ale volně prostorem, kde může nastat kontakt s předměty v okolí a následné zachycení. Tomu lze předejít vedením například trubicí nebo průvlakem. Je však nutné zajistit, aby nedocházelo k nadměrnému tření na trase.

### 2.3.3 Poškození nebo znečištění struny

Problém může být způsoben především nevhodným skladováním materiálu už před nasazením k tisku. Při skladování by cívky měly být v čistém prostředí. [11] Aby se zabránilo negativním vlivům tohoto charakteru při tisku, je třeba navrhnout stojan tak, aby nemohly žádné jeho části filament znečistit (například mazivem). Byla-li vložena cívka s již nečistým povrchem, může být teoreticky vyčištěn povrch filamentu pomocí průvlastku s čistícím povrchem (např. v podobě houbičky nebo kartáčků). Výhodnější se ale jeví cívku celou zvenku otřít. Poškození filamentu je třeba se vyvarovat u stojanu tím, že předejdeme možnosti deformování vlivem nadměrných sil. Zdeformovaný filament může být neuchopitelný pro extruder. [9]

## 2.4 Stojany dostupné na trhu

### 2.4.1 Stojan jako součást tiskárny

Na trhu jsou dostupné tiskárny, které řešení stojanu mají už z výroby. [12] Většinou jde o tiskárny střední a vyšší cenové kategorie. Provedení stojanu se liší podle výrobce, nicméně všechny mají stejné určité znaky. Hlavními funkcemi těchto stojanů je uchycení cívky filamentu, dostatečná pevnost, umožnění odvinu a možnost výměny prázdné cívky za novou. Cívku tedy lze uchytit do prostoru navrženého výrobcem tiskárny, čímž se při splnění podmínek výrobce zbavíme problému umístění cívky. Výhodou je úspora místa – nepotřebujeme externí stojan. Cívka je ve výrobcem doporučeném místě, což minimalizuje délku filamentu mimo prostor tiskárny. Stojan plní svoji funkci při použití předepsané cívky nebo cívky rozměrově a hmotnostně podobné. Problém může nastat, když se uživatel tiskárny rozhodne použít cívku, která záměru výrobce tiskárny neodpovídá. Uživatel je limitován výrobními rozměry stojanu a jeho nosností – velká a těžká cívka se na něj nemusí vejít. Rovněž tak uložení už nemusí plnit svoji úlohu při nárůstu hmotnosti, například nárůstem tření. Tyto stojany také většinou neplní žádnou nadstandardní funkci, jako například měření spotřeby materiálu.



**obr. 2-3** 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3 – Příklad tiskárny vybavené vlastním stojanem [13].

## 2.4.2 Externí stojany vyrobené uživateli tiskáren

Uživatel tiskárny bez vestavěného stojanu musí hledat alternativní řešení v podobě externího stojanu. Oblíbeným řešením jsou stojany vyrobené v domácích podmínkách. Ty se liší podle individuálních představ uživatele o stojanu. V případě minimálních požadavků je možné použít cokoliv, co udrží cívku, například ocelová tyč na libovolném rámu. Tato řešení nejsou technicky zajímavá, neboť svým provedením pouze řeší absenci vestavěného stojanu a funkčně se od nich neliší. Mnohem zajímavější jsou v této oblasti stojany vytvářené jako projekty pro 3D tisk. Existují internetové databáze modelů stojanů, které jsou dostupné ke stažení zdarma [14]. Zde je výběr z velkého množství modelů pro následné vytištění. Vzhledem k počtu modelů je možné najít nejružnější provedení. Zvolit řešení lze i dle zkušeností v recenzích nebo počtu stažení. Řešení je vhodné pro uživatele, kteří tiskárnu aktivně používají a jsou schopni takový stojan vyrobit. Díky tiskárně potřebují nakoupit pouze minimum dílů, jako například ložiska nebo spojovací materiál. Značnou nevýhodou je však výrobní čas a spotřeba materiálu. Tisk nosných prvků je časově náročný a cenově velmi nevýhodný v porovnání s klasickými ocelovými profily. Z hlediska designu jde ovšem o velmi zajímavá a estetická řešení, což dokáže oslovit nejednoho nadšence pro 3D tisk.



**obr. 2-4** Stojan na cívkový filament, externí a univerzální – Toto provedení je plně vytisknutelné na 3D tiskárně, modely lze stáhnout z internetu zdarma [15].

### 2.4.3 Externí stojany od profesionálních výrobců

Hledání externího stojanu dostupného k zakoupení je značně problematický úkol. Navržení profesionálního stojanu až do fáze prodeje přivedlo jen minimální množství výrobců. K nalezení jsou články o stojanech odkazující na zhotovené dostupné modely [16], nicméně na stránkách výrobce mnohdy stojan již není k nalezení [17]. V současné době jsem našel pouze možnost nákupu stojanů od neznámých výrobců na mezinárodních obchodních portálech, s jednou výjimkou, a to speciálním stojanem od firmy Polymaker. Tato firma produkuje a prodává stojan PolyBox Edition II [18], který disponuje schopností nastavení požadované vlhkosti. Výhodou pořízení hotového stojanu je to, že uživatel nemusí nijak řešit jeho výrobu. Nevýhodou je malá možnost výběru. Profesionální modely stojanů s přidanými vlastnostmi jsou spíše výjimkou, na obchodních portálech jsou k sehnání především modely funkcí a vzhledem připomínající uživatelské výrobky. Tyto stojany s omezeným rozsahem upínání a základními funkcemi stojanů přináší jistá rozměrová omezení, ale uživatel bez zvláštních nároků má možnost si vybrat řešení nejbližší jeho představám [19].



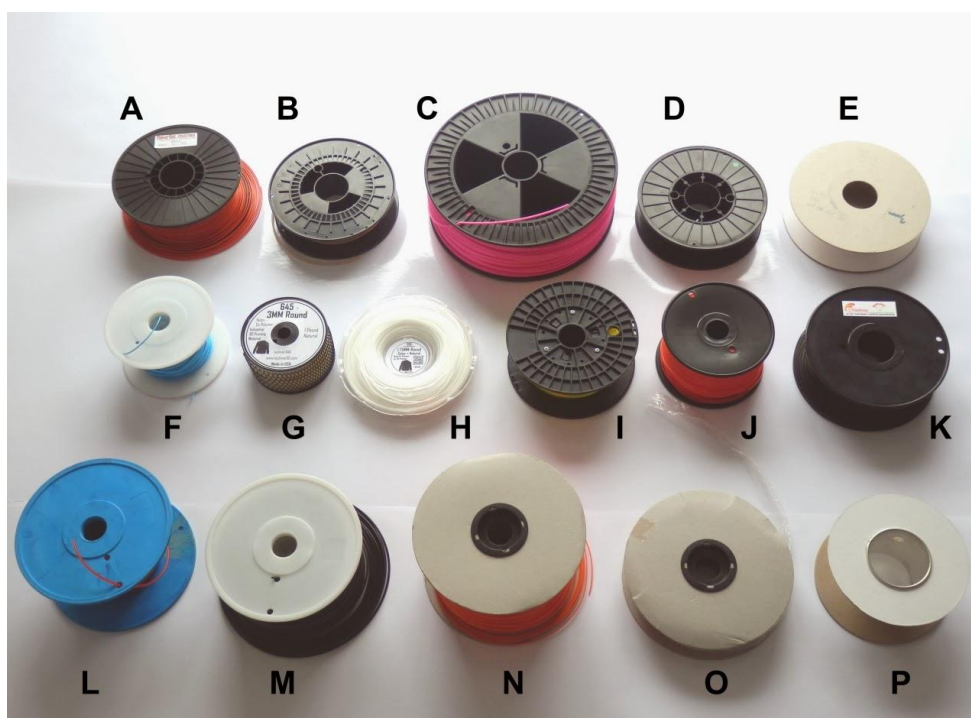
**obr. 2-5** Stojan na cívkový filament PolyBox Edition II od společnosti Polymaker. Přidanou funkcí nad rámec standardních stojanů je funkce ovládání vlhkosti prostoru uložení cívek [20]

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problémů

#### 3.1.1 Problém různorodosti rozměrů cívek

Hlavním problémem při navrhování stojanu na cívky je skutečnost, že neexistuje žádný standard pro rozměry těchto cívek [21]. V roce 2014 byl pokus sjednotit cívky pod jeden rozměrový standard [22], ale byl neúspěšný a neujal se [21]. Uživatel je při volbě cívky odkázán na informace od výrobců, ne všichni ale rozměry uvádí. Některé moje pokusy o získání rozměrů cívek od prodejců byly neúspěšné, přičemž tyto prodejci tvrdí, že rozměry cívek jako vnitřní průměr nebo šířka nikde uvedené nemají. Problém je tedy v tom, že filament pořízený na internetu svými rozměry nemusí na používaný stojan pasovat. Lze teoreticky zvolit filament od prodejce deklarujícího rozměry, ale vzniká tak jistým způsobem omezení ve výběru barev nebo materiálu, což je nežádoucí.



**obr. 3-1** Příklad rozdílnosti rozměrů cívek. Každý výrobce preferuje jiné cívky, mnohdy nelze dopředu zjistit, jak je cívka velká [23].

Abych splnil požadavek na upnutí libovolné cívky v rozsahu od 250 g do 2,5 kg, stanovil jsem si mezní rozměry na základě prozkoumání informací na internetu od uživatelské komunity 3D tiskáren [24], informací od výrobců [25] [26] a prodejců [27]. Rozměry uvažované pro návrh jsou navrženy s rezervami, jelikož databáze založené na zkušenosti uživatelů nejsou stoprocentní a chci se předem vyvarovat možnosti nekompatibility. Pro návrh řešení uvažuji pro cívky v rozsahu rozměrů:

- vnější průměr: 0 až 330 mm – význam má největší rozměr
- vnitřní průměr: 19 až 75 mm
- šířka: 20 až 170 mm

Řešení problému s upínáním mnoha rozměrů cívek lze řešit konstrukcí umožňující pojmut více rozměrů. Takové řešení je výhodné, protože tak uživatel stojanu není nijak limitován rozměry cívek.

### 3.1.2 Problém měření množství spotřebovaného materiálu

Cívkové filamenty se od sebe liší v mnoha ohledech. Výrobci filamentu dodávají materiál různé kvality a výrobních tolerancí [28]. Každý materiál používaný v 3D tisku má taky odlišné fyzikální a mechanické vlastnosti [29]. Obvykle se filamenty prodávají s jasně deklarovaným označením materiálu, barvy, průměru filamentu a hmotností materiálu. Z uváděných veličin má smysl měřit pouze hmotnost, respektive její rozdíl. Důvod je ten, že žádný jiný fyzikální rozměr už není pro účely evidence spotřeby prakticky uchopitelný. Měření například prostřednictvím rozměrů odvinutého materiálu je nepraktické – z naměřené odvinuté délky a průměru filamentu by bylo nutné provést přepočít na objem. Zde vlivem nepřesnosti výrobních rozměrů (které by tvořily vstupní data) a metody měření mohou snadno vzniknout významné chyby. Další přepočít pro získání hmotnosti už by chybu jen zvětšil. Naopak měření hmotnosti zahrnuje pouze chybu měřícího prvku deklarovanou v listu měřidla, a pro účely přepočtu na objem tak již lze použít přesnější veličinu. Jelikož ale evidence podle hmotnosti je nejnázornější pro představy o spotřebě, považuji hmotnost za veličinu nejvýznamnější.

Řešení problému se nabízí v podobě vážení rozdílů hmotností před tiskem a po tisku. Díky znalosti tohoto rozdílu víme přesně, kolik materiálu z cívky ubylo, což je praktické pro evidenci spotřeby.



### 3.1.3 Problémy spojené s uložením

Bezpečné a plynulé odvíjení je nutné k dosažení kvalitního tisku. Tento problém je třeba vyřešit v uchycení cívky. Způsob, jakým se cívka uchytí, ovlivní oba faktory – uchycení vyžaduje minimální odpor proti odvíjení a zároveň setrvání cívky v uložení. Odvíjení vzniká pomocí tahání za filament. Aby nehrozilo poškození filamentu, musí být tažná síla nutná k uvedení cívky do pohybu co nejmenší. V rámci konstrukce je třeba zajistit, aby nevznikala nadbytečná zatížení filamentu.

Bezpečný tisk vyžaduje řešení, které neumožní cívce opustit uložení. Vypadnutí cívky z uložení by mohlo poškodit filament a zhoršit plynulost odvíjení. Proto je třeba konstrukčně zajistit polohu cívky mechanickými prvky tak, aby spolehlivě setrvala po dobu tisku v uložení.

Plynulost odvíjení je přímo spojená s odporem odvíjení a možnostmi pohybu cívky. Různé druhy uložení cívky ovlivní to, jaká forma odporu proti odvíjení vzniká. Pro úvahy řešení o cívce lze uvažovat jako o rotačním válci s válcovou dírou ve vlastní ose rotace, kdy všechny rozměry jsou proměnlivé. Díky tomuto tvaru existuje jen několik prakticky použitelných způsobů uložení, z jejichž analýzy lze odvodit, které z nich vyžaduje nejmenší tažnou sílu, a tedy nejméně namáhá filament. Tato uložení jsou již používána na existujících stojanech.

Řešení těchto problémů je užitečné jak pro účely snadného tisku a prevence poškození filamentu, tak pro celkovou spolehlivost zařízení při tisku.

### 3.1.4 Problém dovíjení a směru tažné síly

Dovíjení cívky je jev, který může nastat nevyváženým uložením cívky nebo vlivem setrvačnosti cívky. Je potřeba ho řešit, protože nadbytečně velké množství filamentu odvinuté navíc se při nevhodném řešení může zachytit při trase do tiskárny a případně se tak poškodit. U cívek také nastává uvolnění vnějších závitů cívky, což může vést k problémům při tisku, vyjmutí materiálu ze stojanu a opětovném skladování. Stojan by těmto jevům měl předcházet konstrukcí tak, aby cívka byla uložena stabilně a nedocházelo tak k nadbytečným pohybům cívky do rovnovážné polohy. Pokud bude vlivem setrvačnosti odpor v uložení překonán, je spíše lepší zajistit cestu filamentu do prostoru, kde dovinitý materiál bude nejméně na škodu. Řešením by mohl být například průvlak. Zároveň by se tak řešil problém nasměrování filamentu pro nejvyšší účinnost tažné síly. Vhodným umístěním průvlaku lze docílit optimálního směru síly.

### 3.1.5 Uživatelské problémy

Z uživatelského hlediska je důležité, aby stojan byl snadno ovladatelný. Protože při nasazování cívky je už jedna ruka zaměstnána držením cívky, je potřeba aby ovládací prvky šly používat pouze pomocí jedné ruky. Při upínání cívky také chceme, aby všechna práce se stojanem byla snadno pozorovatelná. Pro průběžnou kontrolu, upínání a manipulaci je tedy třeba, aby všechny oblasti, se kterými se pracuje, byly dobře přístupné pro pozorování okem. Protože stojan má být používán na různých typech tiskáren, je podstatné, aby stojan byl schopen samostatně stát na svých nohou. Stabilní stojan by se neměl převracet, proto by měl mít dobře umístěné těžiště, čehož lze dosáhnout vhodným rozložením hmotnosti prvků stojanu a dostatečnou vzdáleností podpěrných nohou podstavy od sebe. Uživatel je tak zbaven potřeby stojan něčím zatěžovat nebo hledat speciální povrch pro upevnění – stojan by měl sám o sobě dokázat stát na rovném povrchu. V neposlední řadě by měl stojan umožnit práci s filamentem v celé jeho natažené délce. Průvlečný otvor s dostatečně velkým průměrem poskytne dost prostoru pro zavlečení i vyvlečení filamentu při zachování potřeby vedení filamentu správným prostorem.

Vyřešení uživatelských problémů je klíčové pro jednoduché a praktické použití stojanu. Praktické je to pro úsporu času potřebného na obsluhu a námahy při práci se stojanem.

## 3.2 Cíl práce

Na základě analýzy vyplývá, že cílem práce by měl být stojan řešící všechny uvažované problémy. Hlavní cíl je návrh univerzálního stojanu pro upínání všech variant cívek ve stanovených limitech. Tím se docílí nejen pokrytí rozsahu cívek běžně používaných v laboratoři 3D tisku, ale taky cívek, které může někdo chtít v budoucnu případně použít. Klíčový je minimální odpor v uložení po upnutí cívky. Dále je cílem navržení stojanu tak, aby svou konstrukcí umožnil provádět vážení hmotnosti materiálu pro účel evidence spotřeby. Stojan by dále měl disponovat řešením řízení trasy filamentu pro eliminaci negativních důsledků dovíjení a optimalizaci směru tažné síly. Při všech těchto kritériích je nutné zároveň usilovat o dobrou a praktickou ovladatelnost stojanu.

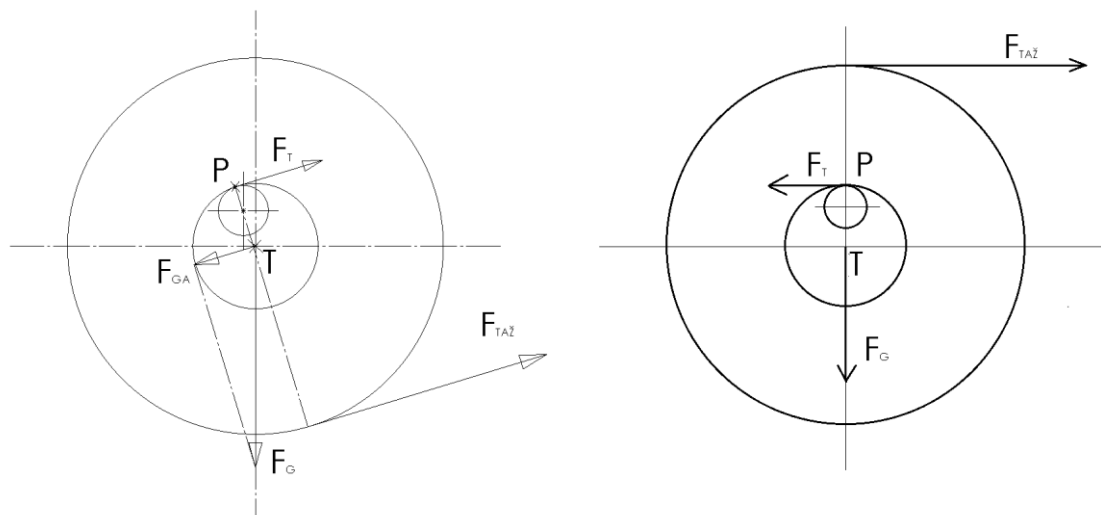
## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

### 4.1 Koncepce používaných typů uložení cívky

#### 4.1.1 Zavěšení cívky na pevný hřídel

První variantou je zavěšení na hřídel s menším průměrem, než je průměr cívky. Jde o řešení používané u vestavěných stojanů 3D tiskáren. Hlavním odporem proti pohybu po hřídeli je tření. Třecí síla v linii styku válcových ploch hřídele a cívky bude působit proti pohybu cívky. Vliv hmotnosti se zde promítá v podobě třecí síly. Ta je důsledkem síly normálové jako reakční vůči tíhové síle. Čím je cívka těžší, tím vyšší je třecí síla.

V závislosti na součiniteli smykového tření mezi cívkou a hřídelí může teoreticky dojít po krátkou dobu i k valení vnitřní plochy cívky po hřídeli. Pokud k němu dojde, přidá se další zatížení filamentu v podobě reakční síly v důsledku vychýlení těžiště cívky. Parametry jako součinitel smykového tření, hmotnost a rozměry cívky jsou všechny dopředu neznámé. Varianta je tak obtížná pro vytvoření výpočtového modelu pro univerzální stojan. Výhodou varianty je snadná výroba provedení stojanu. Lineární závislost třecí síly na hmotnosti na jednu stranu činí metodu nevhodnou pro těžké cívky, na druhou stranu pro uživatele lehkých cívek jde o efektivní řešení.



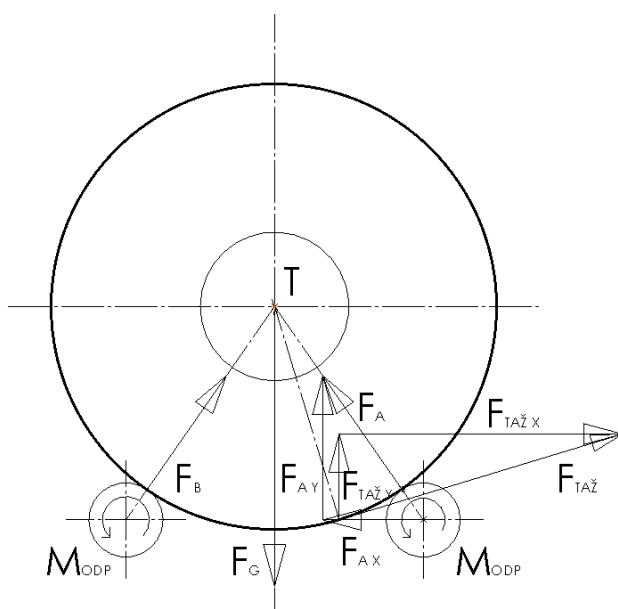
**obr. 4-1** Schematický náčrtek možných silových dispozic při zavěšení spodem (vlevo) a vrchem (vpravo). V závislosti na okolnostech může nastat více případů.

### 4.1.2 Odvalování na dvojici hřídelí

Jinou využívanou variantou je uložení na dvojici hřídelí, které zde plní úlohu podpor. Tyto hřídele pro minimální odpor uvažujeme jako uložené ve valivých ložiscích. Hřídele podpírají cívku, která má díky válcovému tvaru těžiště umístěné mezi podporami – obě hřídele jsou tak za klidu namáhány stejně. Velikost odporu proti odvinu se liší podle rozměrů a hmotnosti cívky. Cívka koná vlivem tažné síly rotační pohyb okolo své osy. Rotační cívky je iniciován odval hřídelí. Odpor proti odvíjení je tak způsoben třením ve čtyřech ložiscích, ve kterých jsou uloženy hřídele.

Úbytek materiálu v cívce mění vzdálenost působíště tažné síly od středu cívky – přibližuje se středu. Zároveň tak mění i délku ramene této síly vůči přední podpoře zachytávající reakci na tažnou sílu. Problém je v tom, že jeden z podpůrných hřídelů je v okamžiku zatažení za filament více namáhán než druhý. Úbytek hmotnosti cívky způsobí postupnou změnu ve statickém rozboru. Teoreticky může nastat situace, kdy dojde k vychýlení cívky kvůli nestabilitě. Rozbor možných situací je komplikovaný. Kromě rozměrů, hmotnosti a součinitelů smykového tření zde vstupuje nová neznámá – osová vzdálenost hřídelí. Tato vzdálenost, bude-li příliš malá, způsobí že cívka může vyskočit z uložení. Bude-li vzdálenost příliš velká, tečná síla přenášená na hřídel pro odval bude příliš malá a cívka se nebude odvalovat.

Tato varianta má výhodu v možnosti použití ložisek, nicméně je nepraktická pro univerzální stojan. Vzdálenost hřídelí by musela být nastavitelná, přičemž není předem jasná vhodná vzdálenost nastavení. Rovnoběžnost hřídelí by byla dána přesností jejich lineárních vodících prvků. Řešení by tak vyžadovalo komplikovanou a přesnou montáž.

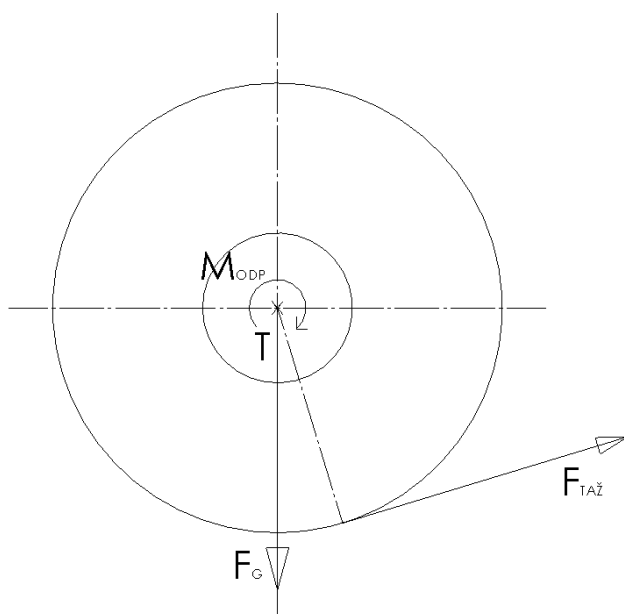


**obr. 4-2** Schematický náčrtek možných silových dispozic při uložení na dva podpůrné hřídele. Existuje možnost více stavů soustavy v závislosti na okolnostech.

### 4.1.3 Upnutí do ložisek v ose cívk

Poslední uvažovaná varianta upnutí cívk je upnutí v ose cívk na hřídele uložené v ložiscích. Spočívá v tom, že dvě hřídele pomocí tvarových upínacích prvků drží cívku za vnitřní válcovou díru. Osa hřídelí je shodná s osou cívk. Při zjednodušení návrhu do rovinné úlohy je cívka uchycena rotačně přímo ve svém těžišti. Tato varianta má jednoduchý rozbor – uchycení jednou rotační vazbou uprostřed kruhového tělesa, která odebrává dva stupně volnosti, a zůstává pouze jeden – rotace okolo vlastní osy. Jedinou formou odporu vůči odvíjení je v tomto případě odpor v ložiscích. Síla, která tahá za filament, působí na cívku na rameni o poloměru aktuálního návínu filamentu, čímž vzniká moment síly. Aby s touto variantou šlo pracovat, musí být navrženy upínací prvky, které dokážou uchytit libovolný vnitřní průměr z uvažovaného rozsahu průměrů. Zároveň jsou zde vyšší nároky na navržení konstrukce, jelikož se předem musí uvažovat maximální vnější průměr cívk. Ložiska musí být pro svou funkci upevněna k rámu, z čehož vyplývá, že aby toto uchycení fungovalo, nelze zde navrhnout jeden nedělený hřídel.

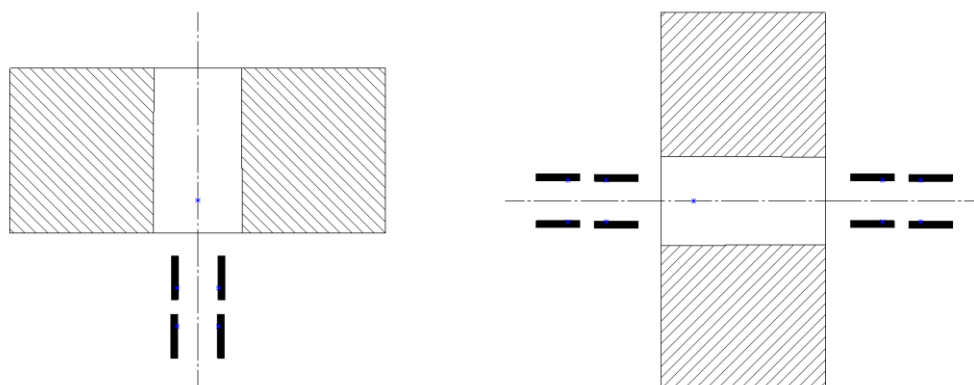
Výhodou varianty je možnost použití ložisek. Nevýhodou je nutnost použití dvou hřídelí místo jedné. Odpor v ložiscích je závislý na hmotnosti cívk, s růstem hmotnosti poroste zatížení, a tak i odpor. Čím větší je návín filamentu, tím je větší rameno síly a větší moment k pohybu cívkou. Varianta se jeví jako vhodná pro univerzální stojan, a to z důvodu minimalizace odporu ložisky a možnosti konstrukce rozměrově adaptabilního řešení i při požadavku symetrie k měření hmotnosti.



**obr. 4-3** Schematický náčrt možných silových dispozic při uložení v rotační vazbě v ose cívk.

## 4.2 Zvolené uložení cívky

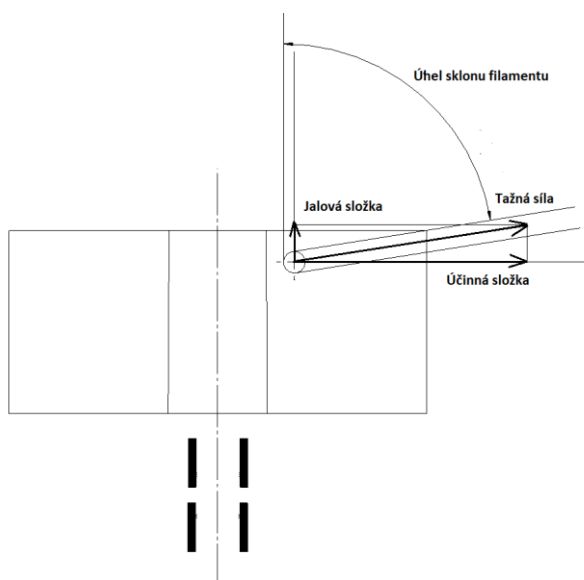
Pro stojan jsem se rozhodl zvolit uložení do ložisek v ose cívky. Pro univerzální stojan, který má pokrýt co největší rozsah používaných cívek, jde o nejvhodnější variantu. Vlivem uložení v ložiscích narůstá odpor v uložení s hmotností méně než u zavěšení, a lze stabilně zajistit poloha cívky při různých rozměrech. Konstrukčně lze zajistit symetrii uložení, a tak zařídit vhodné podmínky pro měření hmotnosti. Uložení do ložisek lze prakticky vyřešit dvojím způsobem – vertikálně a horizontálně.



**obr. 4-4** Koncepční varianty uložení cívek. Vlevo je nakreslena varianta s osou vertikální, vpravo je varianta s osou horizontální.

### 4.2.1 Vertikální varianta v ložiscích

Vertikální varianta poskytuje na jednu stranu výhodu úspory materiálu na konstrukci, ale je nepraktická na výrobu uložení ložisek a z hlediska dispozic tiskárny. Tiskárny odebírají materiál v různých výškách. Pokud by například nastala situace, kdy přívodní místo pro filament na tiskárně je relativně o hodně výše než stojan, směřoval by vektor síly tahající filament a roztáčející cívku tak, že by vznikly dvě složky síly – účinná pro roztáčení, jejíž velikost by s rostoucí výškou vstupního bodu tiskárny klesala, a neúčinná, směřující rovnoběžně s osou cívky, rostoucí s výškou bodu. Skutečná síla potřebná pro překonání odporu v uložení by tak narostla ztrátou vlivem směru síly. Předejít tomuto jevu by šlo u této varianty pouze podložením stojanu pro zvýšení jeho polohy, což je velmi nepraktické. Další možností je průvlak, který ovšem při velkém úhlu opásání může výrazně navýšit odpor proti odvinu. Variantu tak zavrhuji z důvodu nevýhodnosti – pro řadu tiskáren by bylo problém variantu použít, a uložení ve vertikální ose by vyžadovalo uložení dobře zajišťující hřídel proti pohybu dolů, což by vedlo k nutnosti výroby ložiskového domku, nebo nákupu dražších ložiskových kompletů.



**obr. 4-5** Silový rozbor varianty s vertikální osou. Jednou z nevýhod je obtížná eliminace vzniku ztrát vlivem směru tažné síly.

#### 4.2.2 Horizontální koncepce uložení cívky

Varianta s horizontální osou disponuje výhodou v eliminaci vlivu výšky tiskárny vůči stojanu. Změna výšky nemůže ovlivnit účinnou složku, protože filament je vždy tečný k cívce. Jalová složka síly může vzniknout pouze vlivem pohybu extruderu, pokud tiskárna není vybavena vstupním průvlakem. Podle toho, jak do tiskárny filament vstupuje, může uživatel stojan posunout na místo nejvýhodnější pro danou tiskárnu, přičemž je jedno do jaké výšky. Dále je výhodou této varianty možnost použít levné ložiskové jednotky bez zvláštních nároků na zajištění polohy hřídele. Zatížení od tíhy cívky je radiální, axiálně se zde projeví pouze utahovací síla mechanismu upínání cívky. Nevýhodou varianty je potom nutnost vyrobit rám tak, aby šlo cívku upnout mezi hřídele – rozměrově tak bude stojan větší než cívka samotná.

Vzhledem ke snaze o vytvoření stojanu s minimální potřebnou silou k otočení cívkou a dosažení rozumné ceny, zvolil jsem variantu s horizontálním uložením. Aby šlo uchytit libovolný rozměr z uvažovaného intervalu, navrhuji jako uchycovací prvek hřídeli vyměnitelné plastové kužely. Kužel svým tvarem zahrnuje interval průměrů mezi svým největším a nejmenším průměrem. Je tak tedy jedno, jaký přesný rozměr upínací otvor cívky má – kuželová plocha se do kruhové hrany otvoru opře po celém obvodu, je-li průměr obsažen v intervalu kuželu. Varianta je výhodná i z výrobního hlediska. Objednat a nechat vyrobit prvky rámu je levnější a snazší než objednat přesné obrábění ložiskového domku.

## 4.3 Měřicí soustava

Na základě analýzy problematiky měření odvinutého materiálu jsem došel k závěru, že měřena bude v soustavě hmotnost, nebo přesněji její rozdíl. K tomu v digitálních vahách slouží snímače hmotnosti, což je součástka fungující na principu tenzometru. Tenzometr je součástka, která mění svůj elektrický odpor lineárně v závislosti na deformaci [22]. Aby bylo docíleno co nejpresnějších výsledků měření, je třeba s tímto prvkem při návrhu počítat. Pro vážení je výhodná symetrie konstrukce a umístění těžiště měřené soustavy co nejbližší doporučenému místu výrobcem tenzometrického senzoru. U běžných vah jde o střed vážící plochy.

### 4.3.1 Samostatná měřicí soustava

První uvažovaná varianta sestává z tenzometru, AD převodníku, vývojové platformy, displeje a USB kabelu. Tenzometr, pevně přišroubován k rámu stojanu, vlivem deformace mění odpor, což vede ke změnám výstupního napětí. Napětí se přenáší do AD převodníku se zesilovačem, který hodnoty transformuje do digitální podoby a přenesení do vývojové platformy. Zde program v platformě přepočítá napětí na hmotnost a předá informaci na displej a do počítače.

Tuto variantu jsem měl v úmyslu pro stojan použít. Po sestavení a následném testování jsem ji ale byl nucen zavrhnout. Při měření se ukázalo, že při použití komponent dostupných v nepodnikatelské sféře byly naměřené hodnoty silně zatížené chybami. Výstupy se ukázaly být problematické, neboť naměřené hodnoty nevykazovaly lineární ani jinou pravidelnou funkční závislost na hmotnosti a nebylo tak možné naprogramovat spolehlivou rovnici pro přepočet. Profesionální tenzometry a měřicí technika se prodává za výrazně vyšší ceny, a z obchodních podmínek prodejců vyplývá, že jde o sortiment dodávaný pro podnikatelskou sféru.



### 4.3.2 Digitální váha

Pro stojan navrhuji použít digitální váhu s maximálním povoleným zatížením 30 kg s přesností na 2 gramy, jako alternativní řešení pro splnění potřebné funkce. Tato limitní hmotnost zaručí, že běžným zatěžováním nedojde k poškození měřidla, a to ani při manipulaci či ovládání nastavovacích prvků. Přesnost měření na 2 gramy je zvolena z důvodu potřeby zaznamenat i malou spotřebu materiálu. Často se lze setkat s potřebou tisknout malé výrobky. Při hustotě běžně používaných materiálů jako PLA nebo ABS přibližně okolo  $1000 \text{ kg/m}^3$  [29] můžeme při tisku plné struktury uvažovat spotřebu 1 g materiálu na  $1 \text{ cm}^3$  výrobku. Běžně se používá nižší hustota výplně než stoprocentní – znamená to, že při tisku je spotřeba relativně malá. Zařízení pro evidenci spotřeby materiálu tak musí být zaručeně velmi přesné pro zaznamenání takové úrovně spotřeby, alespoň na úroveň 2 gramů. Profesionální váha také poskytuje možnost využít právo reklamovat případnou nefunkčnost nebo využít odborný servis. Bohužel ale není možné data zpracovávat automaticky počítačem, ale pouze čtením z displeje.

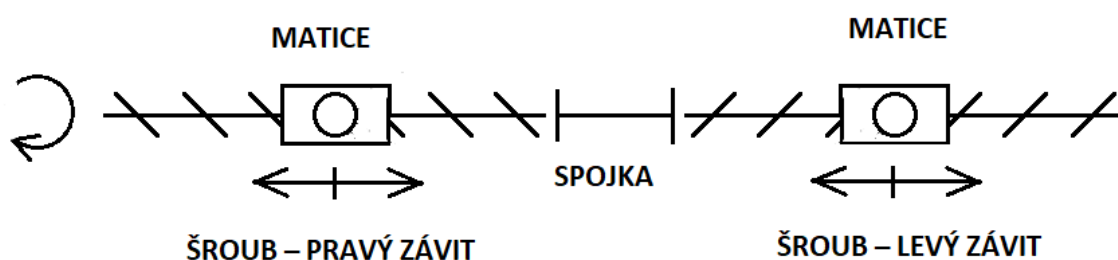
## 4.4 Manipulační soustava

Zvolená varianta uložení vyžaduje pro správnou funkci manipulační soustavu. Kužely na hřídelích s uložení v ložiscích je pro funkci nutné navrhnout tak, aby je šlo k sobě přibližovat a od sebe oddalovat. Zároveň je pro funkci důležité, aby poloha kuželů po nastavení zůstala nastavená a neměnila se v důsledku vnějších vlivů mimo manipulaci uživatelem. Z uživatelského hlediska uvažuji jen varianty ovladatelné pouze jednou rukou. Musí být také zajištěna symetrie konstrukce pro zajištění nejlepších podmínek měření, a to tak, aby jiný, než symetrický pohyb nebyl proveditelný.

### 4.4.1 Koncepce s pravým a levým šroubem

Koncepce sestává ze soustavy tvořené dvěma maticemi a závitového hřídele s madlem. Závitový hřídel obsahuje z jedné strany pravý závit a z druhé levý. Uprostřed je spojovací člen těchto závitů. Otáčení šroubem unáší matice s různými závity. Při otáčení na jednu stranu se tak přibližují a na druhou oddalují. Matice jsou propojeny se sloupky a podepřeny kluzným profilem. Výhodou je úspora prostoru. Také se tím zachovává symetrie konstrukce.

Koncepci jsem zavrhl z důvodu problematičnosti výroby šroubového hřídele a nutnosti použití velmi přesných dílů s vysokými cenami. Bylo by potřeba použít dvě závitové tyče a přesně je spojit pro zaručenou souosost. Při uvažování o koncepci mě nenapadlo jiné řešení, než že by matice tvořily lineární vodící prvek. Aby takto navržená soustava fungovala, bylo by nutné dosahovat vysoké výrobní přesnosti jak matic, tak i šroubového hřídele, přičemž matice by musela být vedena formou drážky nebo a vodícího profilu, nebo kombinace více vodících profilů. Bylo by nutné volit pohybový šroub a profesionální matici s přesně obráběnými vodícími plochami, jinak by se na soustavě mohlo projevovat zadrhávání chodu vedení nebo naopak kývání sloupků.

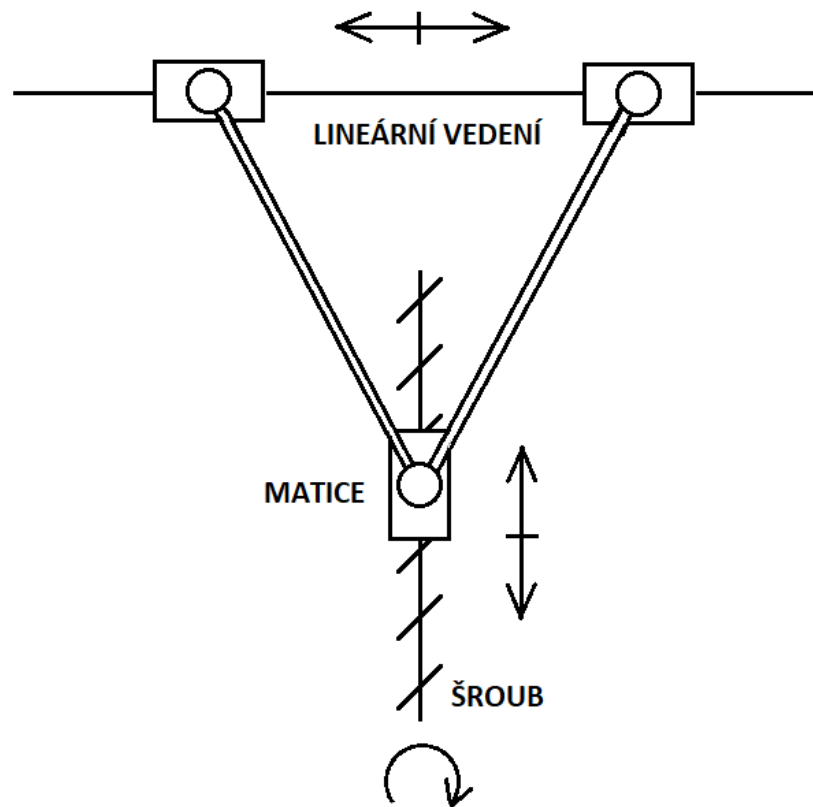


obr. 4-6 Schéma konceptu s pravým a levým šroubem.

#### 4.4.2 Koncepce s vodícím šroubem ze strany

Koncepce funguje na principu lineárního vedení řízeného vodícím šroubem. Pro lineární pohyb sloupků je použito lineární vedení. To zajišťuje nejen přesnost pohybu v ose, ale také pevné a tuhé uložení pro vedené prvky. Cílem je udržování stejné vzdálenosti obou kuželů od osy symetrie vedení. K tomu slouží soustava řídicího vodícího šroubu. Aby soustava byla symetrická, je šroub uprostřed manipulační soustavy. Šroub je uložen v domcích tak, aby jediný jeho možný pohyb byl rotace okolo své osy. Pro otočení šroubem je spojen s madlem. Při otočení se pohyb přenesení do matice. Ta se lineárně pohybuje vpřed a vzad. Pohyb matice se přes tyče zakončené kloubovými vazbami přenáší na vedené prvky, čímž dochází k pohybu na lineárním vedení.

Pro stojan jsem se rozhodl zvolit toto řešení, jelikož lineární vedení s požadavky na přesný chod a tuhost sloupků lze pořídit jako hotový výrobek a není potřeba ho s vysokými náklady nechat vyrábět. Šroub a ostatní prvky pro správnou funkci přesnou výrobu a montáž nevyžadují. Výhodou je tak úspora nákladů a jednoduchá montáž.

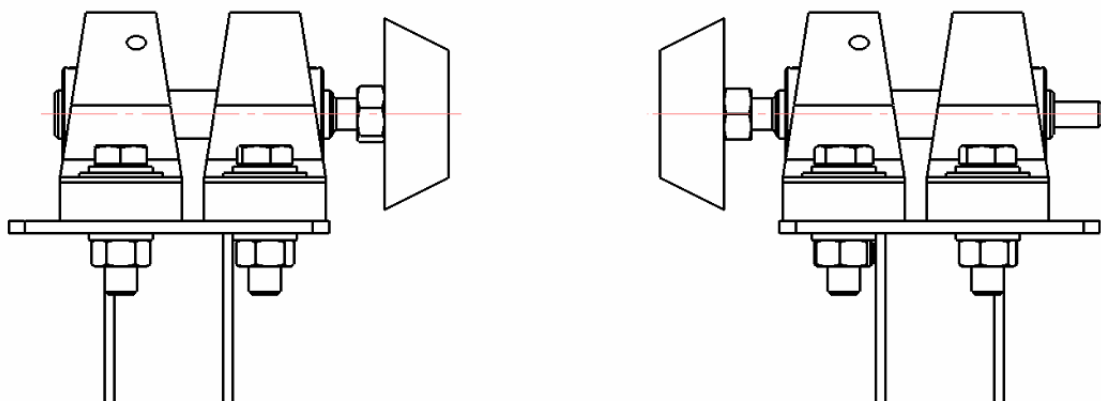


**obr. 4-7** Kinematické schéma manipulační soustavy. Rotační pohyb šroubu se přes závit přenáší do lineárního pohybu matice, odkud se přes kloubově uložené tyče pohyb přenáší dále na lineární vedení.

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

### 5.1 Upínací kužely

Jako upínací prvek byly navrženy upínací kužely. Aby nebylo nutné používat pro upínání silné utažení a zároveň byly rozměrové intervaly přiměřeně velké potřebám tisku, navrhl jsem vyměnitelnou sadu čtyř kuželů. Obsahují závitové zálisky do plastu vnitřním závitem M10 o délce 10 mm ke šroubování na hřídel. Zálisky mají vroubky, které se při zaklepání pomocí šroubu a plastové palice zakousnou do kuželu. V zálisku dochází ke svírání závitu, což zabrání uvolnění nebo pohyb po závitu. Kužel se šroubuje na hřídel do doby, než je jeho čelní plocha slícovaná s čelní plochou hřídele. Kužely jsou 20 mm dlouhé a jsou vyrobeny v rozměrech malý průměr/velký průměr: 14/30, 25/45, 40/60, 55/80. Pojmou tak stanovené limitní hodnoty 19 až 75 mm s 5 mm rezervou. V případě, že se uživatel setká s cívkou mimo tento interval (což je velmi nepravděpodobné), je možné potřebný rozměr kužele při zachování připojovacích rozměrů vyrobit a přidat ho tak k sadě, aniž by se muselo měnit cokoliv jiného na stojanu. Jako materiál kuželů jsem zvolil silon. Obvyklý materiál cívek je plast. Případné vzájemné tření je tak nízké a je nižší riziko poškození při sevření.



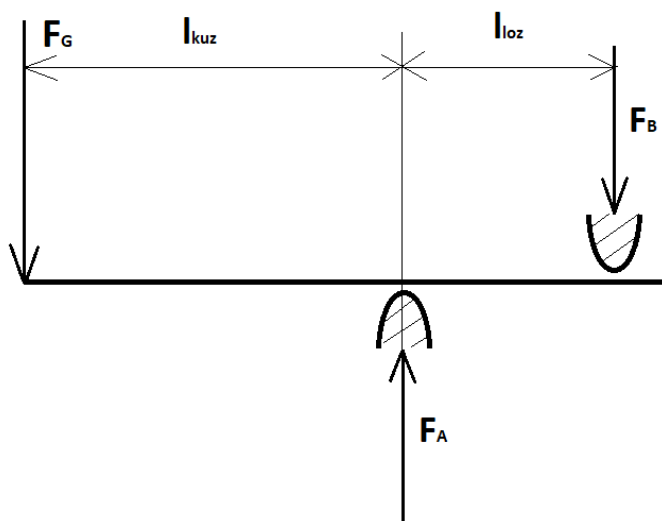
obr. 5-1 Návrh kuželů a jejich uložení.

## 5.2 Hřídele a jejich uložení

Účelem hřídelí je udržet cívku na kuželech ve valivých ložiscích. Na hřídeli je válcová plocha délky 36 mm se závitem M10 pro našroubování kužele. Dále hřídel obsahuje válcovou plochu o průměru 15 mm s tolerancí h9 (na základě doporučení výrobců ložiskových jednotek pro nízké otáčky [30]) a délkou 87 mm – jde o úložnou plochu pro ložiska. Střed této plochy je přístupný zvenku, lze ho použít pro zachycení reakce při utahování kuželů pomocí kleští. Obě plochy hřídele odděluje osazení se zaoblením o velikosti poloměru špičky obráběcího nože, tj. 1 mm.

Pro uložení jsem zvolil ložiskové jednotky UCP 202. Jejich výhodou je velmi nízká cena (v den pořízení 110 Kč/kus), velmi jednoduchá montáž a kompletnost řešení problému valivých ložisek. Každá hřídel je uložena ve dvou ložiscích. Důvod pro použití dvou ložiskových jednotek je nejen nutnost zajistit reakční sílu od zátěže cívky, ale taky nutnost správně nastavit polohu hřídele. Bez dvou bodů uložení by řešení postrádalo prostředek pro montážní seřízení souososti při zachování cíle minimálního odporu. Jednotka sestává z valivého kuličkového jednořadého ložiska, litinového ložiskového domku a maznice. Spojení s rámem je zajištěno drážkami pro šrouby velikosti až M12. Spojení hřídele s ložiskem předpokládá přechodné uložení – hřídel obrobena v předepsané toleranci lze do ložiska nasunout dovnitř mírnou silou, nebo poklepáním měkkou palicí. Pojištění polohy hřídele v ložisku zajišťuje stavěcí šroub. Ložiskové jednotky jsou výklopné, poklepáním měkkou palicí nebo sevřením jednotek kleštěmi vůči sobě lze změnit směr natočení ložiskového tělesa. To je podstatné pro seřízení souososti – na svařovaném sloupku lze vychýlením a podložením domku vyladit nepřesnosti svařování. Volba těchto ložisek tak nevyplývá z namáhání ložisek, ale z potřeby nastavitelného uložení s minimálním odporem.

Vzhledem k malé hmotnosti zátěže – maximální hmotnost cívky 2,5 kg – není třeba řešit hřídel z hlediska pevnosti a průhybu. Ze zadání vyplývá, že podstatný je předpokládaný odpor v uložení proti otáčení. Pro výpočet nehorší předpokládané hodnoty provedu výpočet situace, při které uživatel upne cívku o celkové hmotnosti 3,5 kg (tzn. překročí maximální zatížení o 1 kg). Vstupními hodnotami pro výpočet jsou hmotnost  $m$ , tíhové zrychlení  $g$ , délka od uložení ke konci kuželu  $l_{kuz}$  a vzdálenost mezi ložisky  $l_{loz}$ .



**obr. 5-2** Statický rozbor hřídele uložení cívky. Reakční síly v ložiscích jsou vstupními hodnotami pro zjednodušený výpočet předpokládaného třecího momentu.

$$m = 3,5 \text{ kg}; l_{kuz} = 57,3 \text{ mm}; l_{loz} = 45 \text{ mm}$$

Hřídele jsou dvě a jsou symetricky uloženy. Proto pro výpočet tíhové síly budu uvažovat pouze polovinu hmotnosti cívky, jelikož se rozloží rovnoměrně na obě hřídele.

$$F_G = \frac{m}{2} g = \frac{3,5 \text{ kg}}{2} * 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 17,5 \text{ N}$$

$$\sum F_{iy} = 0 : F_A - F_G - F_B = 0$$

$$\sum M_{iB} = 0 : F_G(l_{kuz} + l_{loz}) - F_A l_{loz} = 0$$

Odvozením z rovnice získáme:

$$F_A = \frac{F_G(l_{kuz} + l_{loz})}{l_{loz}} = \frac{17,5 \text{ N} * (57,3 \text{ mm} + 45 \text{ mm})}{45 \text{ mm}} = 39,8 \text{ N}$$

$$F_B = F_A - F_G = 39,8 \text{ N} - 17,5 \text{ N} = 22,3 \text{ N}$$

Zjednodušený výpočet třecího momentu ve valivých ložiscích při malém dynamickém zatížení je dán vztahem:

$$M_{fr} = 0,5\mu Pd \text{ [31]}$$

Protože pro výpočet neuvažujeme žádné jiné zatížení než radiální, platí:

$$P = F_i$$

kde  $i$  je označení konkrétního ložiska. Z tabulky dle SKF [31] zvolíme pro běžné kuličkové jednořadé ložisko hodnotu smykového tření:

$$\mu = 0,0015$$

Při vnitřním průměru ložisek 15 mm tak můžeme pro ložiska A a B dosadit:

$$M_{frA} = 0,5 * 0,0015 * 39,8 \text{ N} * 15 \text{ mm} = 0,45 \text{ Nmm}$$

$$M_{frB} = 0,5 * 0,0015 * 22,3 \text{ N} * 15 \text{ mm} = 0,25 \text{ Nmm}$$

Součet momentů od všech ložisek působících proti pohybu cívky za rotace:

$$M_{fr} = 2M_{frA} + 2M_{frB} = 2 * 0,45 \text{ Nmm} + 2 * 0,25 \text{ Nmm} = 1,4 \text{ Nmm}$$

Tření při rozběhu je u valivých ložisek dvakrát větší než za jejich chodu. [32]  
Nejvyšší výpočtová hodnota odporu, který může vzniknout, je:

$$M_{odp} = 2M_{fr} = 2 * 1,4 = 2,8 \text{ Nmm}$$

Při předpokladu nejhoršího možného poloměru jádra cívky 10 mm a maximálního momentu proti otáčení, potřebná síla pro uvedení cívky do chodu je tak dána vztahem:

$$F_{taž} = \frac{M_{odp}}{r} = \frac{2,8 \text{ Nmm}}{10 \text{ mm}} = 0,28 \text{ N}$$

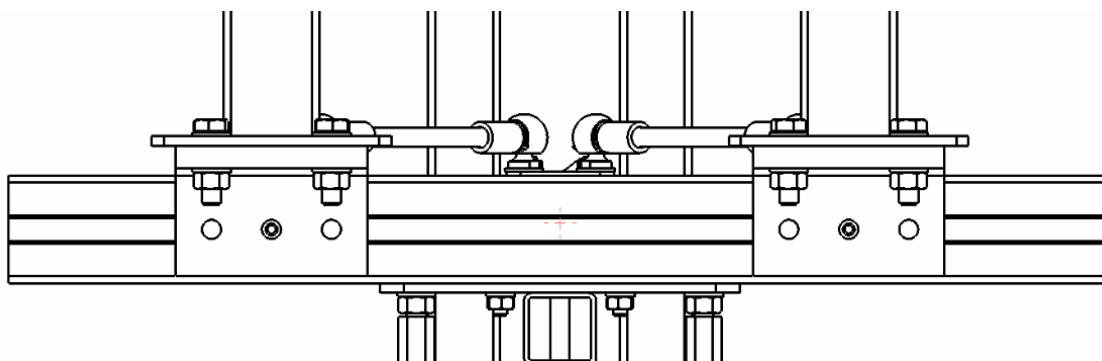
Při těchto výpočtových hodnotách je poškození filamentu tažnou silou vyloučeno. Reálná hodnota odporu bude ovšem rozhodně vyšší, jelikož se do ní promítnou nepřesnosti výroby hřídelí a ložiskových kompletů. Dále se do odporu promítne i druh a množství použitého maziva. V neposlední řadě může výsledný skutečný odpor zvýšit také nepřesná montáž. V rámci výpočtu je zanedbána axiální složka zatížení, neboť jde o proměnlivou veličinu dle utahení kuželů. Kužely není nutné utahovat silně, stačí když jsou díry z obou stran po celém obvodu vymezeny kužely. Otázka odporu proti odvíjení cívky je významně ovlivněna hmotností cívky. V případě, že bude mezi kužely a cívkou nízký součinitel smykového tření, a hmotnost cívky velmi nízká, může nastat situace, při které se nižší odpor bude realizovat při smýkání po kuželové ploše. Při vyšších hmotnostech ale lze očekávat nižší odpor valením v ložisku. Skutečné velikosti odporu v uložení tak lze zjistit až po montáži stojanu experimentálně.

Ložiskové jednotky jsou připevněny ke sloupkům. Sloupky jsou ocelových profilů 40x40x2, na koncích jsou přivařeny plechy s otvory pro šrouby s vřutí. Z jedné strany jsou připevněny ložiskové jednotky, druhá strana slouží k přišroubování sloupků k domkům lineárního vedení. Kompenzace nepřesnosti svařování je při této konstrukci realizována pomocí podložení a naklopení ložiskových domků.

## 5.3 Lineární vedení sloupků

Jako vodící prvek a uložení sloupků jsem zvolil lineární vedení EcoSlide od firmy Bosch Rexroth. Vedení sestává z vodícího hliníkového profilu s drážkami, kluzných prvků z plastu a domků lineárního vedení. K této volbě jsem se rozhodl z důvodu relativní prostorové úspornosti domků – domky byly s délkou 80 mm jedny z nejkratších dostupných řešení. Vedení je vhodné i z důvodu provedení – je tuhé a přesné při rozumných cenách. Dalším důvodem k volbě je dostatečně velká plocha pro přišroubování sloupků. Tato plocha je opatřena čtyřmi dírami pro šrouby s vřtí. Svým provedením poskytuje prostor i pro přišroubování plechu s otvorem pro manipulační prvky.

Přesnost je dána přímostí hliníkového profilu a přesností výroby plastových kluzných prvků. Tři plastové elementy, které mají tvar písmene T, zapadají do obráběných drážek v hliníkovém profilu a opřeny jsou o vnější plochy profilu. Vůle tak vzniká mezi plochami domku a kluzných prvků. Dovolené zatížení vedení je vyšší než provozní zatížení stojanu [33]. Lze tak stojan přenášet držením za sloupek. Výhodami tohoto řešení je jednoduché sestavení a následný bezúdržbový provoz. Dalším důvodem pro volbu řešení je jednoduchost montáže k dalším dílům rámu, protože T drážka umožňuje použití speciálních šroubů, které stačí úzkou podlouhlou hlavou strčit do drážky a otočit. Tím lze bez nutnosti vrtání díry zajistit polohu šroubu a z opačné strany už potom pouze připevnit připojovaný kus a matici.



**obr. 5-3** Lineární vedení. Na obrázku lze vidět vodící profil s domky.

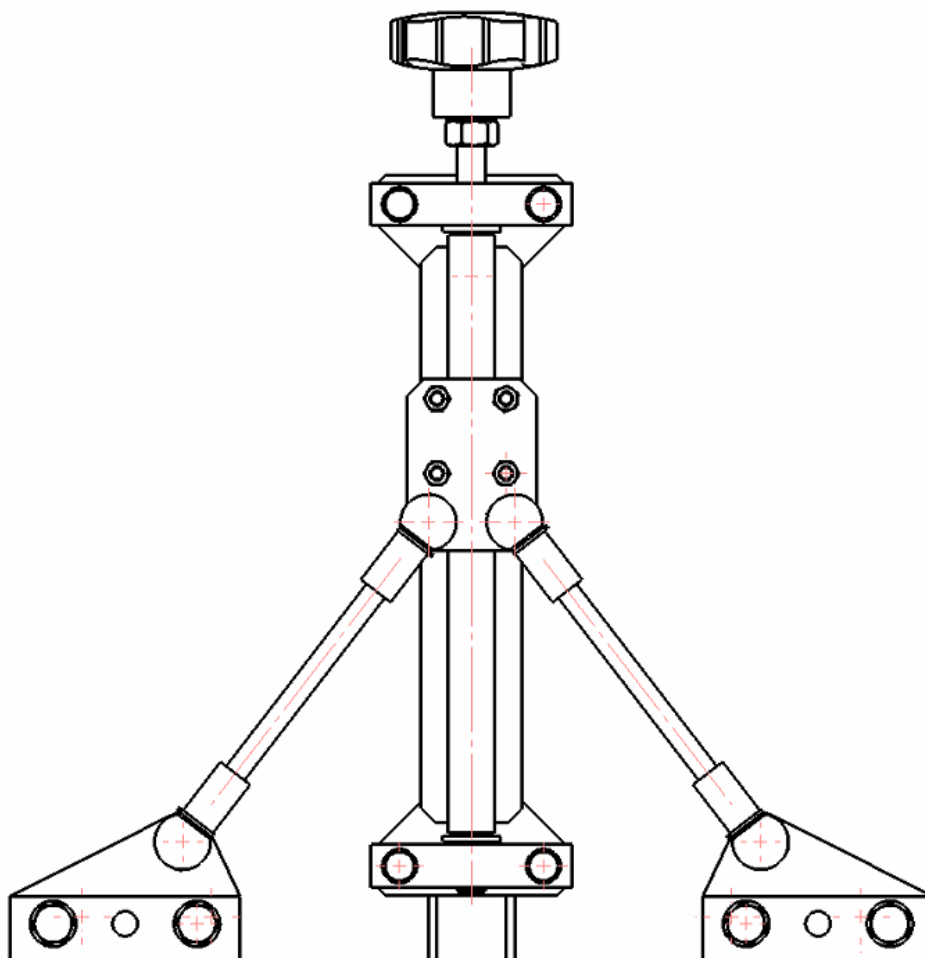


## 5.4 Šroubové vedení domků

Pohyb domků lineárního vedení je řízen pomocí soustavy vodícího šroubu, matice a uložení šroubu. Šroub, uložený v úložných domcích, otáčením okolo své osy unáší matici a tím ji posunuje vpřed nebo vzad. Chod vedení nevyžaduje přesnost a neuvažuje se přenos velkých sil. Vodící šroub je vytvořen ze závitové tyče se závitem M16 délky 290 mm. Tato velikost byla zvolena z důvodu nutnosti vysoustružit na koncích tyče válcové plochy pro uložení šroubu s průměrem 10 mm. Na jednom z konců je vytvořen závit M10 pro madlo. Matice má tvar kvádrů se závitovou dírou uprostřed. Na ploše orientované směrem nahoru jsou závitové díry pro montáž plechu. Kvůli zajištění dobrých kluzných vlastností se matice, která je z oceli, opírá do duralového profilu.

Domky jsem navrhl jako výrobky z duralu. Obsahují jednu úložnou díru pro šroub, a dvě díry s vřutí šroubů na přišroubování k nosnému plechu pro montáž. Na tomto plechu je dále přišroubován duralový vodící profil. Hlavy šroubů držících nosný a opěrný plech na rámu kromě spojení mají dále funkci zábrany proti možnosti vyjet s maticí až k domkům. Poloha a délka šroubového vedení byla navržena na základě pohybové analýzy soustavy v 3D modelu.

K přenosu pohybu z matice na domky lineárního vedení jsem navrhl soustavu normalizovaných kloubů, závitové tyče a plechových ok. Závitová tyč M8 je z obou stran zašroubovaná do kloubů DIN 71802. Tyto klouby jsou levné a spolehlivé řešení rotační vazby. Zároveň tvoří kompenzační prvek pro kompenzování nepřesností, díky možnosti výklonu o úhel až  $15^\circ$  [34] a hloubky zašroubování dle potřeb vzniklých nepřesnostmi. Na straně matice jsou klouby přišroubovány k plechovému oku, které tvoří spojovací prvek mezi maticí a klouby. Na straně domků lineárního vedení jsou klouby přišroubovány do připojovacích ok s dvěma dírami shodnými s dírami v domku a jednou dírou pro kloub.

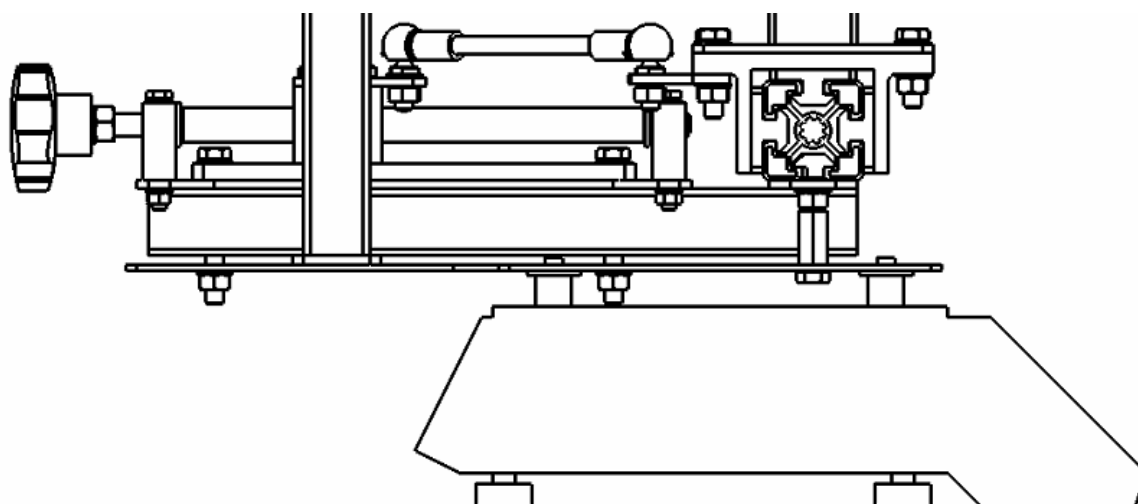


**obr. 5-4** Šroubové vedení domků. Šroub uprostřed posouvá matici a mění tak polohu domků pomocí závitových tyčí a kloubů.

## 5.5 Rám a podstava stojanu

Rám měřené soustavy je svařovaný z tenkostěnného profilu 30x30x2 délky 320 mm a spojovacího plechu s otvory pro šrouby. Lineární vedení se s rámem spojuje pomocí dvou šroubů do T drážek a matic. Spojení je realizováno pomocí plechu s dírami s vůlí pro šrouby. Rozteč děr je 120 mm, díky čemuž je spojení dostatečně tuhé. Soustava vodícího šroubu je s rámem spojena pomocí dvou šroubů, kdy díry pro přišroubování jsou přímo v profilu.

Rám a profil vedení je šrouby připevněn k plechu, který měřenou soustavu propojuje s váhou. Plech zde plní funkci nejen propojovací, ale také definuje polohu uložení na váze. Poloha v návrhu byla zvolena tak, aby těžiště soustavy bylo co nejbližší středu váhy. Jelikož poloha těžiště z modelu a skutečná poloha se mohou lišit (výrobky mohou mít odlišnou hmotnost), je poloha nastavitelná pomocí drážek pro šrouby v plechu. Stojan je v bodech opření na váze postaven na čtyřech nohách.



**obr. 5-5** Rám stojanu. Stojan je jako celek propojen pomocí rámu z ocelového profilu a propojovacího plechu.

## 5.6 Průvlak

Průvlak je tvořen závěsným šroubem DIN 580 M12 a svařovaným rámem z dvou tenkostěnných profilů 30x30x2 délky 200 mm a dvou propojovacích plechů – jeden s otvory pro šroubové spojení s podstavným plechem a druhý s dírou pro šroub. Vycházel jsem z úvahy, že při tisku vždy přebývá v prostoru mezi stojanem a extruderem nadbytečný materiál. Posunutím extruderu do prostoru dál od stojanu dojde k povytažení filamentu. V případě následného pohybu zpět tak zůstane v prostoru mimo cívku nevyužitý materiál. Došel jsem k závěru, že je lepší, když nadbytečný materiál prochází pouze prostorem, kde se nemůže o nic zachytit a ohrozit tak průběh tisku. To platí i pro případ dovinutí vlivem setrvačnosti cívky. Filament je před zavlečením do tiskárny provlečen okem průvlaku. Průvlak má otvor s průměrem 30 mm – je dost velký na to, aby při manipulaci s filamentem za okem šel filament přímo provléct zpátky. Povrch šroubového oka je kulatý. Tření po kulaté ploše nezpůsobí poškození filamentu například odřením o tvrdou hranu. Šroub byl zvolen pro dostatečný průměr otvoru, povrch minimálně ovlivňující tření a možnost jednoduchého přišroubování ke konstrukci. Rozhodl jsem se tak i kvůli ceně 22 Kč, jelikož vyráběný průvlak by měl podobný tvar, jen při vyšší ceně.

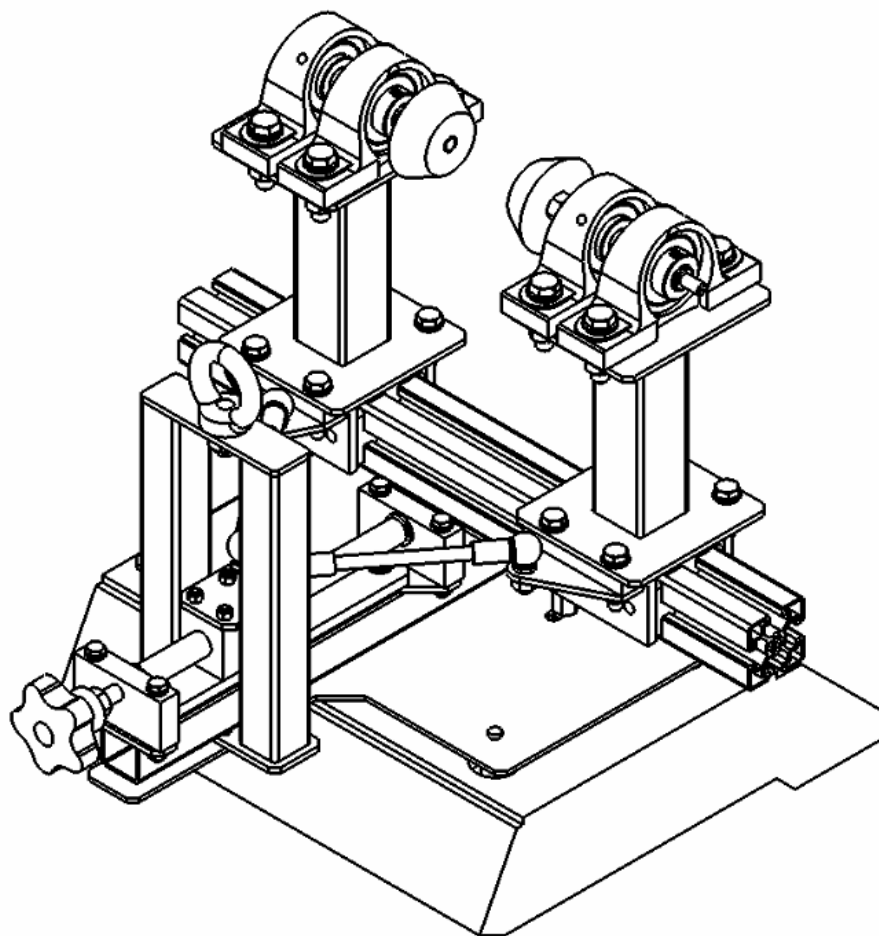
Průvlak je k měřené soustavě připevněn pomocí spojovacího plechu. Spojení k rámu je utažením přes velký spojovací plech pomocí šroubů držících šroubové vedení. Poloha je zvolena tak, aby profily průvlaku neznemožnily pohyb šroubového vedení a zároveň aby průvlak byl co možná nejbližší těžišti soustavy.

## 5.7 Elektronický čítač stojanu

Pro evidenci spotřeby materiálu byla zvolena digitální stolní váha ACS TCS do 30 kg s přesností na 2 g. Váha je alternativou k původnímu vážicímu obvodu, který byl zavržen po neuspokojivém otestování. Váha disponuje elektronickým panelem a ovládáním pomocí kláves. Napájení je dvojího typu – baterií s výdrží 60 hodin chodu, a adaptérem ze sítě. Základní funkcí váhy je zobrazování hmotnosti vážené soustavy. Po spuštění váhy dojde k automatickému vynulování hmotnosti. Při spuštění váhy s upnutou cívku tak docílíme toho, že spotřebou filamentu hmotnost soustavy klesá přesně o hodnotu odebraného filamentu. Po dokončení tisku se tak na panelu zobrazuje rozdíl hmotnosti před a po tisku, který můžeme zaevidovat a víme tak přesně, kolik materiálu bylo odebráno. Váha také disponuje funkcí výpočtu ceny. Pokud přiřadíme k jednotce hmotnosti nějakou finanční hodnotu, přepočít nám tak rovnou vypočítá náklady na materiál spotřebovaný pro tisk.

K propojení váhy s měřenou soustavou jsou ve váze čtyři otvory s průměrem 10 mm. Do nich s vůlí zapadají plastové nohy, které umožňují soustavě mírný pohyb s vůlí mezi nohama a dírami. Nohy jsou přišroubované k spojovacímu plechu samořeznými šrouby, a vůle byla zmenšena pomocí nastavení průměru kolíků elektrikářskou izolační páskou.

## 5.8 Sestava celku



obr. 5-6 Sestava stojanu.

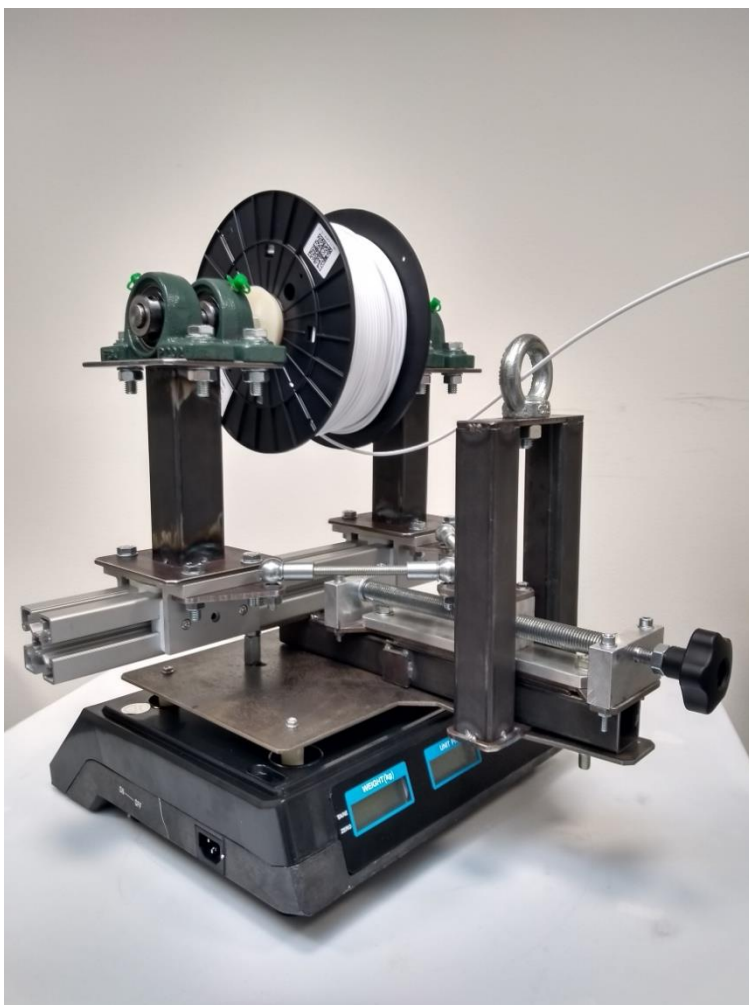
Sestavený stojan na základě návrhu sám o sobě váží 11 kg. Je 500 mm dlouhý, 460 mm široký a 420 mm vysoký. Pro použití stojanu je třeba mít k dispozici rovný a pevný povrch větší, než je stojan, a přístup k zásuvce pro napájení váhy adaptérem. Před použitím postavíme stojan na podklad. Upneme cívku tak, že kužely sedí v otvoru cívky, aniž by došlo k pevnému opření. Následně zapneme váhu a zavlečeme filament skrz oko do tiskárny. Po dokončení tisku odečteme hodnotu rozdílu hmotnosti a vypneme stojan. Nakonec můžeme vyjmout cívku.

## 6 DISKUZE

### 6.1 Rozměrové dispozice

Stojan byl navržen a zhotoven. Na první pohled je mohutnější a větší než běžné stojany. To má své výhody i nevýhody. Nevýhodou těchto rozměrů je fakt, že stojan potřebuje prostor o ploše 0,5 m x 0,5 m, a vyžaduje vynaložení síly na zvednutí 11 kg při přemísťování. Výhodou ale je, že stojan jako samostatně stojící zařízení má s širokou podstavou a svou hmotností vynikající stabilitu. Pro stabilní stání nepotřebuje nijak připevnit nebo zajistit těžším předmětem, stojí pevně sám o sobě. Jeho činná šířka vodícího profilu a výška sloupků mu umožňuje připevnit i velké, 2,5 kg vážící cívky, a navíc poskytuje místo pro ruce uživatele pro manipulování s prvky stojanu. Konstrukce si při svém provedení zachovává těžiště v místě vhodném pro vážení, což umožňuje vážení spotřeby. Stojan je tak na jednu stranu těžší, než by bylo potřebné, na straně druhé ale poskytuje prostorové rezervy pro ergonomii a cívky s nadměrnými rozměry.

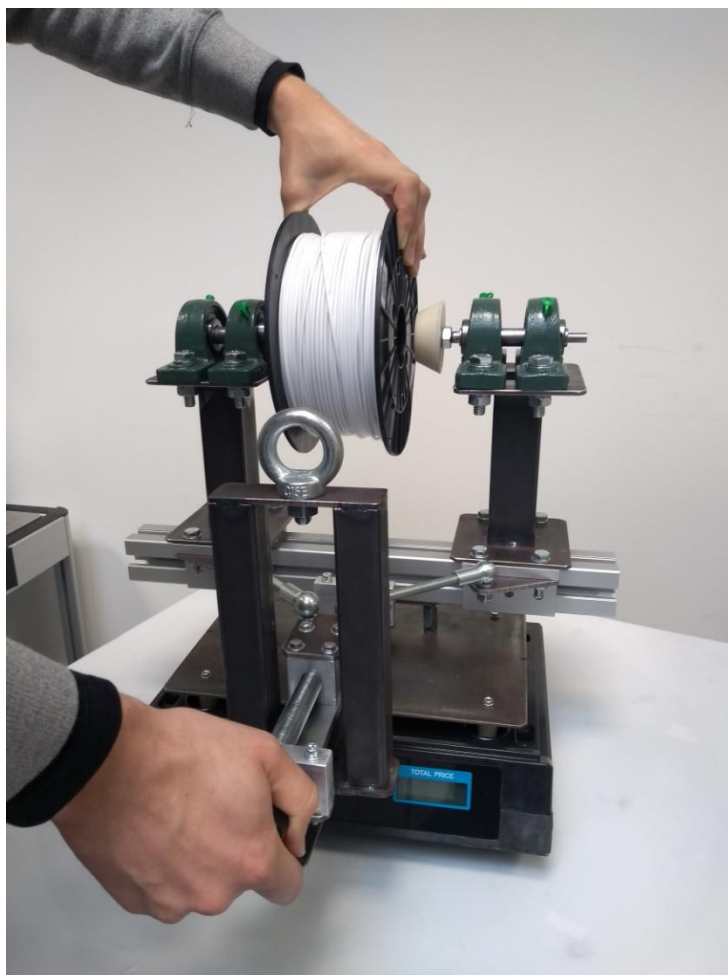
Po vyzkoušení funkce stojanu jsem došel k závěru, že volba prvků vyšší hmotnosti ve spodní části stojanu se kvůli stabilitě ukázala být správná. Nicméně jsem také došel k názoru, že při snaze o co největší rozsah použitelných cívek jsem mírně nadsadil předpokládanou maximální šířku. Zredukováním maximální uvažované šířky cívky na 105 mm by šlo uspořít 75 mm z celkové délky 500 mm na 425 mm a 90 mm šířky z celkové hodnoty 460 mm na 370 mm. Lze tak učinit uříznutím části vodícího profilu, obrobením a zkrácením části šroubu, uříznutím části rámu a úpravou plechu pod manipulační soustavou. V případě upřednostnění rozměrových dispozic před možností upnutí atypických cívek tak je možné dojít k určitým prostorovým úsporám.



**obr. 6-1** Fotografie zhotoveného stojanu s cívkou o hmotnosti 0,8 kg.

## 6.2 Uživatelská zkušenost se stojanem

Ovládání stojanu bylo otestováno upnutím několika cívek. Ovládání upínání otáčením jednou rukou je mírně tuhé kvůli použití lacinější závitové tyče se spojovacím závitem, ale jinak ho lze označit za plně funkční a praktické. Díky ovládání otáčením madla jednou rukou je možné druhou rukou pohodlně usadit cívku na jednom z kuželů, a utahováním docílit sevření cívky kužely. Jediné, co při utahování musíme pozorovat, je tak vstup druhého kuželu do díry, vše ostatní bezchybně zajišťuje navržený mechanismus. Madlo je od oblasti pro upínání ve vzdálenosti optimální pro práci rukama, manipulace tak nevyžaduje jemnou motoriku, přesnost ani šikovnost. Filament lze průvlakem snadno provléct, přičemž takto natažený filament nijak nezasahuje do nežádoucího prostoru na stojanu. Ovladatelnost stojanu tak po testování lze prohlásit za výbornou.



obr. 6-2 Ukázka manipulace se stojanem

### 6.3 Odvíjení filamentu

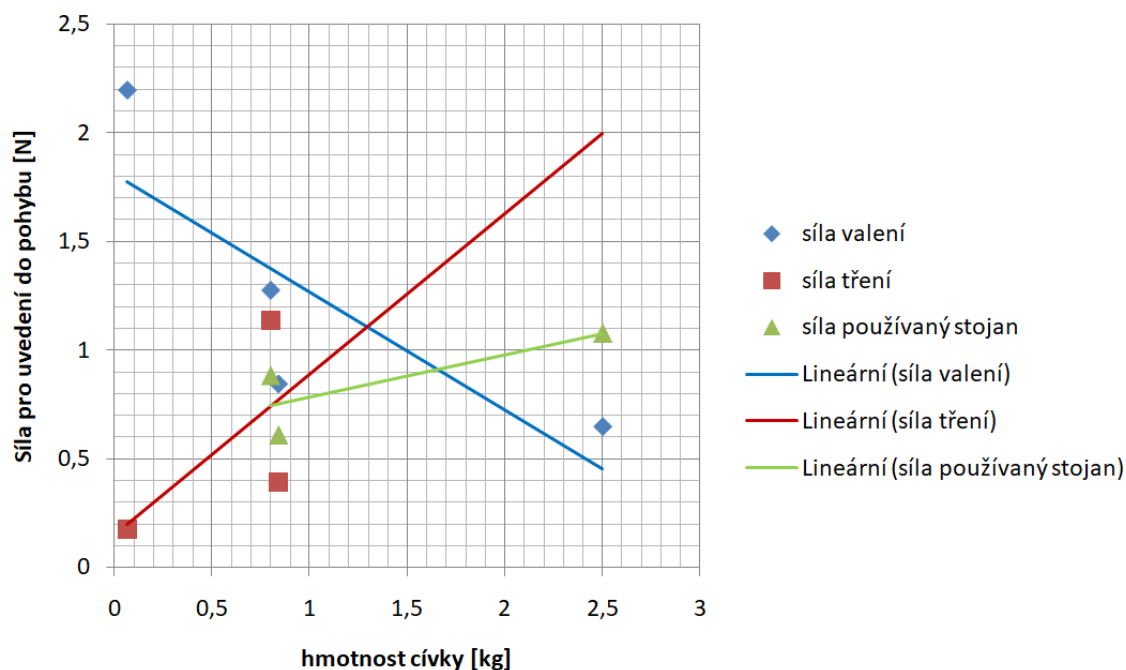
Vlastnosti odvíjení byly otestovány zkoušením síly potřebné pro pohnutí cívkou. Testování bylo provedeno zavěšováním předmětů na filament visící směrem k zemi při upnuté cívce. Hmotnost zátěže byla po malých částech zvyšována do chvíle, kdy jsem zaznamenal pohyb cívky. Následně byla hmotnost zátěže zvážena pro výpočet tíhové síly, která zde představuje sílu potřebnou pro uvedení do pohybu. Pro test jsem použil tři cívky s filamentem o různých hmotnostech a pro rozšíření rozsahu dat i cívku se zednickým provázkem. Pro srovnání jsem použil již existující stojan pracující na principu tření po pevném hřídeli.



Při testování bylo zjištěno, že odpor proti valení v ložiscích je vyšší, než byl vypočtený při návrhu. Při zkoumání možných příčin jsem došel k závěru, že jedním z důvodů je horší válcovitost jedné z hřídelí. Dále pak hraje roli i fakt, že ložiska jsou úplně nová a předmazaná z výroby. Plastické mazivo se ještě nerozložilo rovnoměrně v ložisku a přebytečné nevyteklo ven. V tomto ohledu se dá pravidelným chodem docílit zlepšení. V současném stavu byla střední hodnota odporu proti otáčení cívky při mírném utážení na základě experimentu stanovena na 77 Nmm. Při testu odvíjení se ukázalo, že v intervalu hmotnosti cívek dochází ke dvěma druhům pohybu cívek. Při vyšších hmotnostech koná cívka rotační pohyb valením v ložiscích. Při nižších hmotnostech cívka koná pohyb s třením po ploše kuželů. V experimentu jsem cívku vždy mírně utáhnul, a v případě, že docházelo primárně k pohybu s třením, jsem cívku přitáhnul, aby byla nucena rotovat v ložiscích. Síly nutné k rozpohybování jsem zaevidoval a srovnal.

**tab. 6-1** Srovnání sil potřebných pro uvedení do pohybu.

Hmotnost cívky [kg]	Síla potřebná pro rozpohybování cívky		Stojan pro srovnání [N]	Poznámka
	Navrhovaný stojan – tření [N]	Navrhovaný stojan – valení [N]		
2,50	–	0,65	1,08	ABS 1,75 mm
0,80	1,14	1,28	0,88	PET-G 2,9 mm (filament tvarově zdeformován)
0,84	0,39	0,84	0,61	PET-G 1,75 mm
0,07	0,18	2,20	–	provaz



obr. 6-3 Graf závislosti síly k rozpočítání cívky na hmotnosti cívky. Data jsou aproximována přímkami.

V grafu byly zanedbány vlivy velikosti cívky pro možnost zanesení dat do jednoho grafu. Cívky měly podobnou šířku, takže zde platilo že s hmotností roste i vnější průměr cívky a tím i velikost ramene momentu síly. Z grafu vyplývá, že při stávajícím problému s nepřesnou hřídelí je pro cívku do 1 kg snazší se pohybovat třením po kuželové ploše. Od této hmotnosti je již stejně výhodné nebo výhodnější rotovat s valením v ložiscích. V oblasti hmotnosti mezi 1 kg a 1,5 kg se chová stojan přibližně stejně jako stojan srovnávací. Mimo tuto oblast se už ale výrazně projevují výhody uložení navrženého stojanu. Při malé hmotnosti dosahuje nižšího tření a při větší hmotnosti je méně náročné překonat odpor proti otáčení. Je nutné zdůraznit, že u testovaných cívek obecně platilo, že těžší cívka měla větší průměr, tudíž síla působila na větším rameni. Velká těžká cívka tak překoná odpor proti otáčení snáze, než malá a lehká.

Ačkoliv chování ložiskového uložení je odlišné od předpokladu, lze konstatovat, že funkce uložení stojanu byla po vyzkoušení dobrá. Obzvláště v rozmezí 1,3 kg až 2,5 kg je díky ložiskům viditelné zlepšení v podobě zmenšení potřebné síly k odvíjení. Lze očekávat, že zaběháním ložisek lze docílit postupného zlepšování. V oblasti nízkých hmotností a malých průměrů cívek je zase díky silonovým kuželům dosahováno nízkého tření. Ukazuje se tak, že ve většině rozsahu hmotnosti má stojan lepší vlastnosti než stojan srovnávaný, s potenciálem postupného zlepšování. Hodnoty potřebné síly z testu ukazují, že i v oblasti s nejvyšší potřebnou silou se stojan stále pohybuje v nízkých hodnotách.

## 6.4 Měření úbytku filamentu, samovolné dovíjení a odvíjení

Navržené řešení evidence spotřeby je přesné a spolehlivé. Hodnota úbytku materiálu z cívky byla ověřena jak jednoduchým přidáním předmětu na stojan a odebráním, tak odvinutím části filamentu a zpětným navinutím. Rozdíl byl vždy stejný – změna se při návratu soustavy do původního stavu vrátila do původní nulové hodnoty. Navržené řešení neodpovídá zcela požadavku elektronického čítače se vstupem do počítače, ale údaje je možné do počítače zaevidovat ručně po vizuálním odečtení. Problém evidování spotřeby je tak vyřešen s jistou mírou nižšího komfortu měření. Váha je ale vybavena elektrickými komponentami, které při pokročilých znalostech elektrotechniky a rozebrání váhy je možné na přenosové zařízení pro spojení s počítačem napojit.

Problém dovíjení je vyřešen pomocí průvlaku. Po uvedení cívky do vyšší rychlosti byl filament stále veden okem a nezavádil tak o žádnou jinou část stojanu. Problém odvíjení závitů cívky se mi touto metodou uspokojivě vyřešit nepodařilo – při předem neznámé šířce jsem nedošel k spolehlivé variantě přítlačného prvku, který by měnil velikost s šířkou cívky a nezpůsobil velké zvětšení odporu při různých průměrech. Řešení tak lze označit jako částečné.

## 7 ZÁVĚR

Navrhl jsem stojan na cívkový filament, který je schopen pojmout cívky v rozsahu dle zadání. Svými možnostmi upínání plně pokrývá rozsah požadovaný zadáním, a umožňuje tak upínání malých i hodně velkých cívek. Minimální odpor proti otáčení, kterého bylo dosaženo, je vyšší než předpokládaný návrhovým výpočtem, ale je stále nízký, nijak nenarušuje možnost bezpečného a plynulého odvíjení a používáním lze očekávat mírné zlepšení. Přitom při správném upnutí ve většině případů klade menší odpor proti pohybu cívky než porovnávaný stojan. Je tomu tak i díky možnosti pohybu jak valením v ložiscích, tak třením po kuželech. Uživatelské hledisko stojanu se podařilo vyřešit úspěšně z hlediska možnosti ovládání jednou rukou i přístupnosti pro ruce a vizuální kontrolu. Větší rozměry a hmotnost stojanu jsou nevýhodou pro skladování a přenos, ale z pohledu stability jde o přínos. Stojan umožňuje snadno a spolehlivě měřit spotřebu materiálu, nicméně v podobě méně pohodlné, než předpokládá zadání. Průvlak svou funkci v zabránění dovíjení a odvíjení plní jen částečně. Cíle byly do velké míry splněny. Z hlediska možností dalšího vývoje vedoucího ke zlepšení je zde otevřená otázka vývoje řešení proti samovolnému odvinu, propojení váhy s počítačem a možnost redukce velikosti za cenu zmenšení upínatelného rozsahu cívek.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. 3D tisk. *Wikipedie*. [Online] 13. 5 2018. [Citace: 17. 8 2018.] [https://cs.wikipedia.org/wiki/3D\\_tisk](https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk).
2. **Nano3Dprint**. 3D Printing: A Brief History of Printing Methodology. *nano3Dprint*. [Online] 24. 2 2017. [Citace: 17. 8 2018.] <https://www.nano3dprint.com/single-post/2017/02/21/3D-Printing-A-Brief-History-of-Printing-Methodology>.
3. 3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE. *ABC3D*. [Online] [Citace: 17. 8 2018.] <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>.
4. **Bensoussan, Hannah**. The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. *Sculpteo*. [Online] 14. 12 2016. [Citace: 17. 8 2018.] <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today>.
5. **RepRap community**. About. *RepRap*. [Online] 19. 10 2018. [Citace: 14. 5 2019.] <https://reprap.org/wiki/About>.
6. Fused Deposition Modeling (FDM). *Materialise*. [Online] 2019. [Citace: 25. 4 2019.] <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>.
7. FDM technologie. [Online] TECNOTRADE OBRÁBĚCÍ STROJE s.r.o., 2018. [Citace: 25. 4 2019.] <https://www.objet.cz/uploads/images/fdmtechnologie.jpg>.
8. **Průša, Josef**. Příručka 3D tiskaře. *Prusa Research s.r.o.* [Online] 2018. [Citace: 7. 9 2018.] [https://www.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d\\_manual\\_mk3\\_cz.pdf](https://www.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk3_cz.pdf).
9. Print Quality Troubleshooting Guide. *Simplify3D*. [Online] 2018. [Citace: 9. 9 2018.] <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting>.
10. Inconsistent extrusion. [Online] Simplify3D, 2019. [Citace: 25. 4 2019.] <https://www.simplify3d.com/wp-content/uploads/2015/09/Inconsistent-Extrusion.jpg>.
11. How do I keep my nozzle running smooth? *dddop*. [Online] 2019. [Citace: 14. 5 2019.] <https://www.dddop.com/3d-printing-prevent-clogging/>.
12. 3D tiskárny. *Prusa Research s.r.o.* [Online] 2019. [Citace: 25. 4 2019.] <https://shop.prusa3d.com/cs/17-3d-tiskarny>.
13. Original Prusa i3 MK3. [Online] Prusa Research s.r.o., 2019. [Citace: 25. 4 2019.] [https://www.elegant3d.cz/fotky60649/fotos/\\_vyr\\_430\\_3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3.jpg](https://www.elegant3d.cz/fotky60649/fotos/_vyr_430_3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3.jpg).

14. THINGS TAGGED WITH 'SPOOL HOLDER'. *Thingiverse*. [Online] 2019. [Citace: 25. 4 2019.] [https://www.thingiverse.com/tag:spool\\_holder](https://www.thingiverse.com/tag:spool_holder).
15. **Creative Tools**. Universal stand-alone filament spool holder (Fully 3D-printable). *Thingiverse*. [Online] MakerBot Industries, LLC, 20. 10 2014. [Citace: 27. 4 2019.] [https://www.threeding.com/image/t5/product\\_image\\_5487.jpg](https://www.threeding.com/image/t5/product_image_5487.jpg).
16. Finally, An Intelligent Spool Holder: The MonsterFeed. *Fabbaloo*. [Online] 5. 1 2016. [Citace: 25. 4 2019.] <https://www.fabbaloo.com/blog/2016/1/2/finally-an-intelligent-spool-holder-the-monsterfeed>.
17. Monsterfeed spoolholder. *Monsterfil*. [Online] 2015. [Citace: 25. 4 2019.] <https://monsterfil.com/monsterfeedtest>.
18. PolyBox Edition II. *Polymaker*. [Online] 2019. [Citace: 25. 4 2019.] <https://eu.polymaker.com/product/polybox-edition-ii/>.
19. Search: Spool holder 3d filament. *EBay*. [Online] 2019. [Citace: 25. 4 2019.] [https://www.ebay.com/sch/i.html?\\_nkw=spool+holder+3d+printer&ul\\_noapp=true](https://www.ebay.com/sch/i.html?_nkw=spool+holder+3d+printer&ul_noapp=true).
20. PolyBox Edition II. [Online] Polymaker, 2019. [Citace: 28. 4 2019.] <https://eu.polymaker.com/wp-content/uploads/sites/4/2018/10/PolyBox%E2%84%A2-Edition-II-resized.png>.
21. **Reprap contributors**. Filament spool. *RepRap*. [Online] RepRap, 17. 8 2016. [Citace: 28. 4 2019.] [https://reprap.org/wiki/Filament\\_spool](https://reprap.org/wiki/Filament_spool).
22. **RichRap3D**. Universal 3D printing filament spool standard 2014. *RichRap Blog*. [Online] 13. 3 2014. [Citace: 28. 4 2019.] <https://richrap.blogspot.com/2014/03/universal-3d-printing-filament-spool.html>.
23. The problem. *RichRap Blog*. [Online] 13. 3 2014. [Citace: 29. 4 2019.] [https://1.bp.blogspot.com/-46lDeu20o4s/Uxh3P\\_BJEaI/AAAAAAAAEHY/Y79tpJogB9I/s1600/Filament\\_spools\\_Markup\\_A\\_to\\_P\\_Small.jpg](https://1.bp.blogspot.com/-46lDeu20o4s/Uxh3P_BJEaI/AAAAAAAAEHY/Y79tpJogB9I/s1600/Filament_spools_Markup_A_to_P_Small.jpg).
24. **walter**. Empty Filament Spool Weights and Dimensions. *Thrinter*. [Online] 28. 5 2015. [Citace: 28. 4 2019.] <http://thrinter.com/empty-spool-weights/>.
25. What is the size of the spools? *colorFabb*. [Online] 11. 9 2018. [Citace: 28. 4 2019.] <https://support.colorfabb.com/support/solutions/articles/13000003167-what-is-the-size-of-the-spool->.
26. Spool Comparison Guide – 3D Printer Spools. *MakeShaper*. [Online] Santronics, Inc., 2019. [Citace: 28. 4 2019.] <https://www.makeshaper.com/spool-comparison/>.
27. 3D printer filament spool sizes. *iDig 3D Printing*. [Online] 2018. [Citace: 28. 4 2019.] <https://www.idig3dprinting.co.uk/news/how-to-guides/3d-printer-filament-spool-sizes/>.

28. **Lonnie Bramon.** Filament tolerances. *Precision 3D Filament*. [Online] 29. 7 2014. [Citace: 28. 4 2019.] <https://precision3dfilament.com/blogs/news/15202543-filament-tolerances>.
29. Filament properties table. *Simplify3D*. [Online] 2019. [Citace: 28. 4 2019.] <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>.
30. TR Mounted Ball Bearings UCP 200 series. *NBC Group*. [Online] 30. 11 2010. [Citace: 30. 4 2019.] <http://file.seekpart.com/keywordpdf/2010/11/30/20101130113044234.pdf>.
31. Friction. *Exvalos*. [Online] SKF. [Citace: 30. 4 2019.] [http://www.exvalos.com/soubory/6000\\_EN\\_00\\_04\\_Friction\(2\).pdf](http://www.exvalos.com/soubory/6000_EN_00_04_Friction(2).pdf).
32. **SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS.** *Konstruování strojních součástí*. Překlady vysokoškolských učebnic. Brno : VUITUM, 2010. str. 610. Sv. 3. ISBN 978-80-214-2629-0.
33. EcoSlide 45x45x80. *Bosch Rexroth AG*. [Online] 2019. [Citace: 1. 5 2019.] <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/assembly-technology/basic-mechanic-elements/elements-for-manual-movement/ecoslide/ecoslide-trolley/ecoslide-45x45x80>.
34. DIN 71802-NI. *P a B, spol. s r. o.* [Online] elesa + GANTER, 2019. [Citace: 1. 5 2019.] <http://www.pab.cz/files/i019.pdf>.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

$m$ [kg]	hmotnost
$g$ [m.s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$l_{kuz}$ [mm]	délka úseku mezi koncem hřídele a ložiskem
$l_{loz}$ [mm]	délka úseku mezi dvěma ložisky
$F_G$ [N]	síla tíhová
$F_A$ [N]	síla na ložisko A
$F_B$ [N]	síla na ložisko B
$M_{fr}$ [N.mm]	moment třecí pro jedno ložisko za chodu
$\mu$	součinitel smykového tření
$d$ [mm]	vnitřní průměr ložiska
$P$ [N]	ekvivalentní dynamické zatížení ložiska
$M_{frA}$ [N.mm]	moment třecí pro ložisko A za chodu
$M_{frB}$ [N.mm]	moment třecí pro ložisko B za chodu
$M_{odp}$ [N.mm]	moment třecí celkový za rozběhu
$F_{taž}$ [N]	síla tažná od filamentu
$r$ [mm]	poloměr jádra cívky



## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>obr. 2-1</b>	Schéma tiskárny pracující na principu FDM. Data z počítače (1) řídí tisk. Extruder (2) vtahuje filament z cívky (3). Extruder se pohybuje pouze ve dvou osách v rovině, vertikální osový pohyb zajišťuje stolek (4). Výrobek (5) je tvořen výrobním materiálem (červeně) a podpůrným materiálem (oranžově) [7].	17
<b>obr. 2-2</b>	Nesouvislá extruze. Při bližším pohledu na stopu lze odhalit proměnlivou tloušťku stopy. Jednou z příčin tohoto jevu může být zadržávající filament [10].	18
<b>obr. 2-3</b>	3D tiskárna Original Prusa i3 MK3 – Příklad tiskárny vybavené vlastním stojanem [13].	20
<b>obr. 2-4</b>	Stojan na cívkový filament, externí a univerzální – Toto provedení je plně vytisknutelné na 3D tiskárně, modely lze stáhnout z internetu zdarma [15].	21
<b>obr. 2-5</b>	Stojan na cívkový filament PolyBox Edition II od společnosti Polymaker. Přidanou funkcí nad rámec standardních stojanů je funkce ovládání vlhkosti prostoru uložení cívek [20]	22
<b>obr. 3-1</b>	Příklad rozdílnosti rozměrů cívek. Každý výrobce preferuje jiné cívky, mnohdy nelze dopředu zjistit, jak je cívka velká [23].	23
<b>obr. 4-1</b>	Schematický náčrt možných silových dispozic při zavěšení spodem (vlevo) a vrchem (vpravo). V závislosti na okolnostech může nastat více případů.	27
<b>obr. 4-2</b>	Schematický náčrt možných silových dispozic při uložení na dva podpůrné hřídele. Existuje možnost více stavů soustavy v závislosti na okolnostech.	28
<b>obr. 4-3</b>	Schematický náčrt možných silových dispozic při uložení v rotační vazbě v ose cívky.	29
<b>obr. 4-4</b>	Koncepční varianty uložení cívek. Vlevo je nakreslena varianta s osou vertikální, vpravo je varianta s osou horizontální.	30
<b>obr. 4-5</b>	Silový rozbor varianty s vertikální osou. Jednou z nevýhod je obtížná eliminace vzniku ztrát vlivem směru tažné síly.	31
<b>obr. 4-6</b>	Schéma konceptu s pravým a levým šroubem.	34
<b>obr. 4-7</b>	Kinematické schéma manipulační soustavy. Rotační pohyb šroubu se přes závit přenáší do lineárního pohybu matice, odkud se přes kloubově uložené tyče pohyb přenáší dále na lineární vedení.	35
<b>obr. 5-1</b>	Návrh kuželů a jejich uložení.	36
<b>obr. 5-2</b>	Statický rozbor hřídele uložení cívky. Reakční síly v ložiscích jsou vstupními hodnotami pro zjednodušený výpočet předpokládaného třetího momentu.	38

<b>obr. 5-3</b>	Lineární vedení. Na obrázku lze vidět vodící profil s domky. ....	40
<b>obr. 5-4</b>	Šroubové vedení domků. Šroub uprostřed posouvá matici a mění tak polohu domků pomocí závitových tyčí a kloubů. ....	42
<b>obr. 5-5</b>	Rám stojanu. Stojan je jako celek propojen pomocí rámu z ocelového profilu a propojovacího plechu. ....	43
<b>obr. 5-6</b>	Sestava stojanu. ....	45
<b>obr. 6-1</b>	Fotografie zhotoveného stojanu s cívkou o hmotnosti 0,8 kg. ....	47
<b>obr. 6-2</b>	Ukázka manipulace se stojanem ....	48
<b>obr. 6-3</b>	Graf závislosti síly k rozpohybování cívky na hmotnosti cívky. Data jsou aproximována přímkami. ....	50

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

### 11.1 Výkresová dokumentace